

févier 2010

Rapport d'études

Les outils d'évaluation des projets routiers

D'Ariane à TransCAD

Sommaire

Ce rapport d'études fait le bilan du changement d'outil utilisé dans le RST pour la modélisation des trafics interurbains et l'évaluation des projets d'infrastructures routières : d'Ariane à TransCAD.

Il est à destination des modélisateurs dans les Centres d'Études Techniques de l'Équipement et des commanditaires des études de trafic : il permet de faire la synthèse des choix de développement pour le nouvel outil, de mieux en comprendre les principes pour la mise en pratique, et enfin d'expliquer les différences entre les résultats donnés par les deux outils.

Le premier chapitre rappelle le contexte et les objectifs du développement des modules Sétra de TransCAD. Le deuxième présente les grands principes des modèles communs aux deux outils. Les chapitres III et IV étudient les différences dans les principes d'affectation du trafic et ceux du bilan socio-économique. La dernière partie fait le point sur les méthodes et les outils de modélisation des trafics interurbains, avec une synthèse des changements et des améliorations apportés par le nouvel outil.



Page laissée blanche intentionnellement

Les outils d'évaluation des projets routiers

D'Ariane à TransCAD

Collection les rapports

Document édité par le Sétra dans la collection « les rapports ».
Cette collection regroupe les rapports d'études, de recherche,
d'expérimentation, les synthèses de connaissances.

Introduction

Dans le cadre de sa mission d'amélioration et de diffusion de la méthodologie à appliquer pour les études d'évaluation des projets d'infrastructure de transport, le Sétra déploie des outils techniques et logiciels.

Dans les années 1970, le Sétra a développé le logiciel Ariane pour mener l'évaluation des projets routiers. Celui-ci permet de modéliser les trafics routiers interurbains et de réaliser le calcul de bilan socio-économique selon les préconisations des différentes instructions relatives à l'évaluation de projet qui se sont succédées.

Dans le but d'améliorer les pratiques de modélisation, en utilisant les possibilités des systèmes d'information géographique (SIG) et en permettant l'introduction dans les modèles des modes de transports alternatifs à la route, le ministère s'est doté en 2003 d'un nouvel outil du commerce TransCAD®, qui a été adapté à ses besoins avec le développement de modules complémentaires, appelés modules Sétra de TransCAD, distribués en Cété en 2006.

Afin d'estimer et de comprendre les différences entre les résultats obtenus avec TransCAD et l'outil Ariane utilisé préalablement au ministère, des études de comparaisons basées sur l'évaluation d'un projet d'infrastructure en utilisant en parallèle les deux logiciels ont été commandées à tous les CETE qui utilisaient Ariane. Non seulement ces études ont favorisé la prise en main des chargés d'études en CETE sur le nouvel outil, s'inscrivant ainsi dans le plan d'accompagnement du déploiement de TransCAD, mais elles ont aussi permis de faire la recette des modules (le contrôle et la vérification des programmes) sur des cas d'études réels et d'identifier certains points d'amélioration du logiciel et des techniques dans son utilisation.

Par ailleurs, le Sétra a mené une réflexion plus théorique, basée sur des exemples simplifiés, permettant d'expliquer les différences dans les mécanismes et leur paramétrage entre les deux outils et de mettre en évidence de bonnes pratiques à observer pour l'utilisation des modules Sétra.

Ce rapport d'étude a pour objectif de mutualiser les enseignements des six études comparatives qui ont été menées dans les CETE et des analyses théoriques du Sétra pour chacune des étapes de l'évaluation de projet routier, depuis la modélisation pour l'étude de trafic jusqu'au bilan socio-économique.

Le chapitre 1 présente un court historique et le contexte de l'étude : il précise les champs de la comparaison entre les deux logiciels.

Le chapitre 2 rappelle les grands principes de l'évaluation de projets, qui ont été conservés d'un outil à l'autre, et identifie les points d'évolution qui font l'objet d'un approfondissement dans les parties suivantes.

Le chapitre 3 se concentre sur la modélisation des trafics, c'est-à-dire tout ce qui concerne les principes d'affectation du trafic.

Le chapitre 4 porte sur les méthodes d'évaluation, l'analyse coûts-avantages et les calculs d'indicateurs de rentabilité socio-économique.

Les études réalisées par les CETE viennent enrichir ce rapport dans chacune des composantes d'une étude d'évaluation de projet présentées dans les chapitres précédents, mais également en termes d'utilisation du logiciel d'un point de vue qualitatif dans le chapitre 5.

Pour conclure, le chapitre 5 fait le bilan du passage d'Ariane à TransCAD, synthétise les avantages et les inconvénients de chacun des outils, et décrit les nouvelles possibilités offertes par TransCAD et les points d'amélioration déjà à l'étude.

Table des matières

Chapitre I
Contexte, enjeux et objets de l'étude

1 - Contexte historique

1.1 - Une évolution nécessaire de l'outil Ariane pour la réalisation des études de trafic routier interurbain

Comme l'indique le guide des études de trafic interurbain [1] de 1992, l'étude de trafic est un élément fondamental qui intervient en amont de toute réflexion relative à l'aménagement des infrastructures de transport. Elle constitue un des outils de base pour rechercher les solutions optimales d'aménagement compte tenu des problèmes mis en évidence, des évolutions prévisibles et des objectifs.

Dans le cadre des projets de création ou d'amélioration d'infrastructures de transport, la modélisation du trafic a pour objectif de prévoir les niveaux de trafic à un horizon lointain sur la nouvelle infrastructure et sur le reste du réseau. Les études de trafic sont ainsi appelées à jouer un rôle essentiel pour la planification et la programmation des investissements routiers en fournissant les données pour les bilans socio-économiques des différentes alternatives étudiées. En effet, le nombre et l'importance des investissements publics au regard d'une capacité de financement limitée, tout comme l'évolution du contexte économique, financier, social et européen, obligent à être particulièrement attentif à leur choix et à leur programmation.

En tant que tête du Réseau Scientifique et Technique (RST), le Sétra a pour mission notamment d'améliorer les méthodes de modélisation de trafic et d'assurer la bonne mise en œuvre de ces méthodes au sein du réseau.

Le Sétra a développé, dans les années 70, le logiciel Ariane qui permettait aux Centres d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) d'effectuer des études de trafic pour le compte du Ministère. Cependant, bien que largement modernisé dans les années 90, ce logiciel ne donnait plus entière satisfaction.

En effet, les études de trafic ont beaucoup évolué dans les années 90 notamment en termes de complexité et de taille de l'aire d'étude, les réseaux étant de plus en plus maillés. De nouveaux projets comme les contournements de grandes agglomérations concernaient à la fois des trafics urbains et interurbains, le logiciel Ariane s'avérant peu adapté à ce contexte. Enfin et surtout, on prenait de plus en plus conscience de l'importance d'étudier les autres modes alternatifs à la route.

Il est alors apparu que le logiciel Ariane ne pouvait plus répondre à ces nouvelles exigences sans une opération de rénovation significative. En parallèle, il existait déjà dans le commerce de nombreux logiciels de modélisation de trafic, utilisés au ministère notamment en milieux urbain et périurbain. Le Sétra a alors réalisé une étude d'opportunité dont l'objectif était d'évaluer les deux scénarii possibles concernant le nouvel outil par rapport aux besoins des utilisateurs : développement maison ou à partir d'un logiciel support existant sur le marché avec un prestataire. Suite à cette étude, le comité de pilotage mis en place pour définir quelles évolutions du logiciel choisir a décidé le 15/01/2001 de retenir le scénario du progiciel du commerce, principalement pour des raisons d'évolutivité, de pérennité et d'adéquation aux besoins des utilisateurs et du maître d'ouvrage sur le long terme. Pour plus de détails, on trouvera la synthèse comparative des deux scénarios en Annexe 3.

Par ailleurs, le modèle d'affectation d'Ariane reposant sur la loi d'Abraham avec une valeur du temps moyenne était remis en cause car il ne permettait pas de reproduire la diversité des comportements liée à la variabilité des valeurs du temps des usagers. Il a ainsi été décidé de remplacer ce modèle par celui mis au point par l'Inrets : le modèle prix-temps avec aléa. Le chapitre 3 explicite en détail les principes de ces lois d'affectation.

1.2 - Les études préalables concernant l'affectation Prix-Temps

Le modèle d'affectation du trafic routier est le cœur du logiciel Ariane ainsi que des modules Sétra de TransCAD. Alors qu'Ariane fait appel à la loi d'Abraham, les modules Sétra reposent sur un modèle d'arbitrage Prix-Temps. L'étude des différents types de modèles d'affectation est largement documentée dans les revues de recherche. Nous rappelons ici les travaux qui ont guidé le choix du prix-temps pour les modules Sétra.

Les principaux travaux réalisés par l'Inrets (Fabien Leurent) concernant les modèles d'affectation du trafic qui ont participé à l'élaboration de l'affectation Prix-Temps telle qu'elle est implémentée dans le nouvel outil sont :

- 1993 : cost versus Time Equilibrium over a Network. *European Journal. of Operation. Research* [2] ;
- 1995 : une boîte à outils (MARS) pour opérer diverses affectations statiques du trafic routier [3] ;
- 1996 : the theory and practice of a dual criteria assignment model with a continuously distributed value of time [4].

Concernant l'affectation bi-critère (autre nom pour prix-temps), on peut également se référer aux travaux initiaux de Claude Abraham [5], de F. Barbier Saint-Hilaire [6] (Mode d'emploi du logiciel Davis-Tribut-Equilibre, 1992-1996) ou encore ceux de Robert Dial [7] (Bicriterion trafic assignment: efficient algorithms plus examples, 1996).

Par leur reconnaissance en France et à l'étranger, ces travaux de recherches scientifiques ont montré le bien fondé théorique et pratique du principe de l'affectation prix-temps.

À la suite de ces travaux de recherche, le Sétra a passé une convention avec l'Inrets (Fabien Leurent) en 1995 [8] afin d'étudier, d'évaluer et de comparer deux principes de répartition du trafic entre itinéraires concurrents sur un réseau de transport routier interurbain :

- l'affectation logit logarithmique, couramment appelée loi d'Abraham, implémentée dans Ariane ;
- l'affectation bi-critère prix-temps, implémentée aujourd'hui dans les modules Sétra de TransCAD.

Fabien Leurent conclut à une égalité relative des deux modèles. Ils ont chacun leur faiblesse : pour la loi d'Abraham, l'uniformité des comportements face aux divers attributs de coût généralisé, et pour la loi prix-temps, les itinéraires tenus pour inefficaces alors que certains automobilistes les choisissent. En parallèle, la sélection automatique des chemins est un point fort du modèle prix-temps.

On peut également citer un autre article de Fabien Leurent qui compare différents principes de répartition du trafic et leur paramétrage, intitulé "Les valeurs du temps des automobilistes à Marseille en 1995" [10] et qui montre l'importance de la dispersion des valeurs du temps entre les usagers de la route.

Toutes ces recherches soulignent les apports de la méthode d'affectation prix-temps, dont les principaux avantages et limites seront repris dans le chapitre 3.

A la suite de ces travaux, le Sétra décide d'approfondir ses recherches sur le modèle prix-temps. Une deuxième convention est passée en 1998 avec l'Inrets intitulée “ Calcul de deux modèles d'affectation ”[9]. Cette convention donne pour les différents composants des modèles, comme la recherche automatique d'itinéraires, les organigrammes et les algorithmes décrits de manière précise afin de les implémenter dans un logiciel. Elle a permis de préparer la mise en œuvre du modèle Prix-Temps pour qu'une société d'ingénierie informatique puisse programmer des modules utilisables par les services du ministère via un logiciel standard d'étude des déplacements.

2 - L'élaboration du nouvel outil

2.1 - L'opération IMAPT

L'opération **IMAPT** (pour Informatisation d'un Modèle d'Affectation Prix-Temps) a consisté à développer un outil à partir d'un logiciel du commerce, permettant de réaliser les mêmes études qu'avec Ariane, et avec des possibilités supplémentaires comme celle de réaliser des études multimodales par exemple.

L'opération IMAPT a été menée selon la méthode du Ministère de l'Équipement Cheops/Khefren de management d'opération d'informatisation pour les projets complexes (pour la maîtrise d'ouvrage et les maîtres d'œuvre). Elle s'est déroulée de la façon suivante :

1. A l'issue de l'étude d'opportunité réalisée en 2000, la Direction des Routes opte pour le remplacement de l'outil "Ariane" par un logiciel existant du commerce.
2. Le projet fonctionnel réalisé en 2001 aboutit à la rédaction des pièces du marché.
3. La consultation est menée en 2002 par une procédure d'appel d'offres sur performances dont l'objet était la fourniture et l'adaptation d'un logiciel de planification des transports.
4. Après avoir été sélectionné, le groupement Sétec International – Caliper travaille entre 2003 et 2006 à la réalisation du logiciel baptisé « les modules Sétra de TransCAD » et qui comprennent :
   - un module d'affectation routière prix-temps ;
   - un gestionnaire des scénarios de projet ;
   - une procédure de calcul socio-économique.
5. La recette des prestations du marché est effectuée en plusieurs phases parallèlement aux prestations, les relevés d'anomalies étant transmis au fil de l'eau afin que le prestataire puisse rapidement en tenir compte. Les anomalies détectées par la suite ont été traitées dans le cadre de la garantie d'un an après la fin du marché puis du contrat de maintenance depuis 2008.
6. Le projet d'accompagnement a aidé à la mise en place du logiciel chez les utilisateurs, par l'organisation de formations et la réalisation d'études dites de comparaison entre les deux logiciels.

Pour mémoire, le montant total du marché s'élevait à 455 000 €, selon la décomposition suivante :

- tranche ferme : développement : 307 000 € ;
- tranche conditionnelle 1 : acquisition de 25 licences : 125 000 € ;
- tranche conditionnelle 2 : formations : 23 000 €.

En 2008, afin de répondre aux besoins d'études, cinq autres licences de TransCAD ont été acquises dans le cadre du marché de maintenance (montant d'achat par licence supplémentaire : 5 000 € ; montant de la maintenance annuelle par licence : 800 €).

2.2 - Le projet d'accompagnement et les formations

Les CETE ont été associés au projet de renouvellement des outils d'évaluation des projets routiers dès 2001 avec la réalisation d'une enquête dans le cadre de l'étude d'opportunité. De plus, un utilisateur au CETE de Lyon a été plus particulièrement associé à l'opération et a suivi toute la préparation du marché à savoir l'élaboration du cahier des charges, le choix des critères de sélection, la participation en tant qu'expert aux réunions de la commission d'appel d'offres. A noter également que le CETE de l'Est a participé à la recette fonctionnelle du module de bilan socio-économique.

Dès juin 2003 et pendant le déroulement du marché, le logiciel TransCAD (sans les modules Sétra) a été diffusé dans les CETE. A cette occasion, plusieurs séries de formation ont été organisées :

- formation d'initiation à TransCAD en juin 2003 avec au moins une personne par CETE (15 participants dont 11 des CETE) ;
- formation spécifique "études multimodales" avec TransCAD sous forme de 2 sessions en avril et juin 2004 (28 participants dont 25 des CETE). En parallèle, des expérimentations sous TransCAD ont été lancées dans plusieurs CETE.

Afin d'assurer l'appropriation du nouveau logiciel par les utilisateurs d'Ariane, les CETE ont été sollicités pour réaliser des études d'expérimentations avec le nouveau logiciel.

De 2007 à 2009, de nouvelles formations ont été données par le Sétra, après une refonte de la documentation. Le Sétra a publié deux documents qui sont les références de base à l'utilisation des logiciels :

- guide d'utilisation de TransCAD pour la représentation de l'offre et de la demande de transport multimodales [16] ;
- guide d'utilisation des modules Sétra de TransCAD [17].

Ces formations ont permis aux nouveaux arrivants dans le RST de se former à la modélisation des trafics avec TransCAD, mais aussi de faire des rappels à ceux qui n'avaient pas mis en pratique les connaissances acquises lors des précédentes formations.

3 - Enjeux de l'étude

3.1 - Objectifs du passage d'Ariane à TransCAD

L'enjeu général du passage d'Ariane à TransCAD concerne l'amélioration des pratiques de modélisation. Nous rappelons ici les objectifs d'améliorations initialement fixés car la présente étude devra vérifier si ces objectifs ont été atteints.

Le nouvel outil doit d'abord être plus performant sur les projets les plus souvent rencontrés. En effet la construction du réseau autoroutier français commencée dans les années 60 est bien avancée : la construction des grands axes est achevée et il s'agit maintenant d'étudier des réseaux maillés sur de grandes échelles (comme l'axe rhodanien) ou des grands contournements d'agglomérations (par exemple à Lyon ou Strasbourg).

De plus, il est aujourd'hui impensable d'étudier un projet de transport d'un point de vue purement routier. Pour chaque projet routier, se pose entre autres, la question des éventuels reports depuis/vers le ferroviaire. On peut également s'interroger sur la possibilité de remplacement du projet d'infrastructure routière par un service ferroviaire. Il est donc nécessaire d'avoir un outil qui permette de réaliser des études multimodales et de modéliser des services de transport en commun.

La pratique des études de trafic a ainsi beaucoup évolué depuis plusieurs années, et on peut résumer les enjeux concernant la mise en œuvre des modèles de trafic :

- des aires d’études plus vastes ;
- des milieux étudiés plus denses : autrefois purement interurbains, ils touchent de plus en plus les territoires périurbains aux abords des grandes agglomérations, de sorte que les enjeux urbains et interurbains sont de plus en plus imbriqués ;
- des études plus complètes : elles doivent appréhender les enjeux des différents modes, qu’il s’agisse de l’impact du projet sur les autres modes ou de l’opportunité du choix du mode ;
- des réseaux décrits plus finement, ce qui se traduira par une augmentation du nombre d'itinéraires en concurrence pour chaque relation Origine-Destination (OD) ;
- des zones géographiques plus détaillées, donc une forte augmentation du nombre d'OD ;
- des systèmes de transport à modéliser plus complexes : réseaux multimodaux, transports privés et services de transport en commun ;
- globalement une explosion du volume et de la variété des données, d'où la nécessité de pouvoir confronter les informations et de les échanger avec d'autres bases de données et d'autres outils automatiquement.

Parallèlement à l'identification des enjeux du changement d'outil, les besoins des utilisateurs avaient été recensés en 2000, dans le cadre de l'étude d'opportunité finalisée en 2001. Les principales attentes remontées étaient les suivantes :

- une modularité de l'outil permettant de réaliser des études multimodales et offrant plus de libertés dans les paramétrages (possibilité de modifier les valeurs du temps, les courbes temps-débit, …) ;
- l’automatisation de certaines tâches, notamment la recherche automatique des itinéraires ;
- l’intégration de bases de données géoréférencées ;
- la possibilité d'échanger des données avec d'autres logiciels ;
- l’augmentation de la vitesse d'exécution (chargement des données, sauvegarde des résultats).

Le recensement complet des besoins exprimés par les utilisateurs d'Ariane est donné en Annexe 2.

Le tableau suivant liste tous les objectifs qui avaient été fixés au nouvel outil (dont certains auxquels répondait déjà Ariane) tels qu'ils ont été résumés dans l'étude d'opportunité :

Objectifs principaux	Gains attendus	Comment mesurer
Modèle d'affectation prix-temps + aléa	Meilleure représentation des comportements de choix d'itinéraires et de la concurrence autoroute/route gratuite	Test sur une étude
Automatisation du choix des itinéraires	Gains de temps, Objectivité dans les choix d'itinéraires, Augmentation de la précision de description du réseau	Interviews des utilisateurs
Calcul des bilans socio-économiques	Réponse aux exigences de la circulaire, au moins au même niveau que le système actuel	
Calcul du bilan financier	Réponse aux exigences de la circulaire	
Représenter la signalisation et ses effets	Meilleure représentation des comportements de choix d'itinéraires	
Traiter les projets périurbains	Meilleure adéquation avec l'observation dans les zones urbanisées	Temps passé au calage
Décrire plus finement le réseau	Meilleure description des données Finesse des résultats Traitement facilité des projets périurbains	
Faire des études de projets multimodaux	Prise en compte de l'intermodalité (Loi d'orientation sur les schémas de service)	
Avoir la possibilité de faire des modèles de génération/distribution	Possibilité de travailler autrement qu'à partir des enquêtes (qui posent de nombreuses difficultés)	

Les objectifs précédents assignés au nouvel outil ne concernent que le volet "modélisation des trafics" de l'étude de projet de transport.

Pour les bilans socio-économiques, les méthodes de calculs sont précisément définies par des textes réglementaires qui évoluent au cours du temps. Il s'agit aujourd'hui de l'instruction cadre du 25 mars 2004 relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mise à jour le 27 mai 2005 [12], et de sa déclinaison routes : l'instruction DGR relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains (*version provisoire du 23 mai 2007*) [13]. Les méthodes d'évaluation ayant évolué dans le même temps que le développement du nouvel outil, le passage d'Ariane à TransCAD devait tenir compte des changements de la nouvelle instruction. Ceux-ci font l'objet du chapitre 4.

On peut d'ailleurs lire dans cette dernière instruction, qu'elle constitue une mise à jour du dispositif d'évaluation de projet, et « qu'elle s'accompagne de la rénovation de certains outils et du logiciel support des évaluations, qui permettra la gestion de scénarios d'aménagement prenant en compte, le cas échéant, les interactions avec les autres modes, sous réserve de la disponibilité des données.»

Enfin cette instruction rapporte que «la recherche de la transparence, qui caractérise l'ensemble de la démarche, nécessite la définition claire des enjeux, la lisibilité du processus d'évaluation et le soin apporté à la présentation et à l'interprétation des résultats, indispensables à l'éclairage des choix, aux exigences du débat démocratique et à l'exercice d'une contre-expertise». La transparence est ainsi également un enjeu fort du passage d'Ariane à TransCAD.

Cette étude montrera dans quelle mesure les objectifs initiaux ont été atteints.

3.2 - La comparabilité entre les résultats

Outre la vérification de l'atteinte des objectifs initialement fixés au nouvel outil, notre étude aborde la comparabilité des études réalisées avec les deux logiciels. On souhaite en effet pouvoir comparer deux projets qui ont été étudiés avec des logiciels différents.

Cela est d'autant plus nécessaire que le transfert des études d'Ariane à TransCAD ne peut se faire instantanément. De plus, afin d'assurer la continuité des études, le logiciel Ariane peut encore être employé. Cette étude doit donc faciliter le transfert de logiciel en explicitant les points de divergence qui méritent une attention particulière lors du changement d'outil.

Concrètement, on souhaite s'assurer qu'il y a une certaine stabilité dans les résultats des études entre les deux logiciels : on s'attend au minimum à ce que les ordres de grandeur soient respectés. On s'intéresse ainsi à la robustesse des modèles, gage de la qualité des études de trafic. Concernant les écarts observés, on souhaite être capable d'expliquer leur provenance. En effet, nous allons voir par la suite qu'étant donné le nombre d'éléments en jeu, cela n'est pas évident.

Les études de comparaisons Ariane-TransCAD lancées en Cété (cf. liste en Annexe 1) avaient pour objectif entre autres de savoir expliquer les éventuelles différences sur des projets ayant fait l'objet d'étude avec les deux logiciels.

Avant d'entrer dans la comparaison des résultats des deux logiciels, il faut rappeler que les études de projets ne sont pas réalisées dans le but d'être comparées entre elles, mais qu'elles servent à déterminer l'opportunité d'un projet ou la meilleure option d'aménagement pour un projet donné. Les projets routiers sont des réalisations induisant des effets complexes, et l'on ne saurait les réduire aux quelques indicateurs socio-économiques obtenus par l'étude de trafic. Ceux-ci doivent donc être considérés comme des outils d'aide à la décision en permettant d'estimer l'ordre de grandeur et surtout le sens dans lequel le projet influe pour chaque catégorie d'avantages. Ils restent extrêmement liés à leur méthode de calcul, et nécessitent une interprétation relative et objective par rapport aux problèmes posés.

Étant donné le nombre de paramètres et de données en entrée et la complexité des relations qui les relient à l'intérieur des modèles de trafic, l'explication des différences entre les résultats est un exercice long et difficile, et il apparaît ainsi normal qu'il y ait des écarts qui ne s'expliquent pas simplement. Nous allons maintenant voir précisément quel est le champ d'étude retenu pour cet exercice.

3.3 - Objet et champ de l'étude

Le champ de l'étude est celui de l'utilisation des outils comme Ariane ou les modules Sétra de TransCAD, à savoir celui des études de projet routier en milieu interurbain, voire périurbain. Ces études font appel à deux types de tâches :

- la modélisation des trafics ou déplacements ;
- l'évaluation socio-économique de projet.

Après la présentation des grands principes communs aux deux logiciels dans le chapitre 2, les chapitres 3 et 4 étudient ces deux parties de l'étude de trafic de façon indépendante. Ils se basent sur l'analyse des principes théoriques et leur application sur des exemples simples. Nous analysons ainsi l'impact des différentes composantes et de leurs paramètres sur les résultats de manière isolée.

A partir de ces éléments, le bilan présenté dans le dernier chapitre tâchera de mettre en évidence les causes et les origines des différences observées dans les résultats obtenus avec les deux outils pour des études de tailles réelles. Enfin, nous mettrons en évidence les nouveaux champs d'étude rendus possibles par l'utilisation de TransCAD.

Chapitre II
Des grands principes d'évaluation conservés d'un outil à l'autre

1 - Les principes généraux identiques

1.1 - Un même objectif

Les modules Sétra de TransCAD ont été développés pour répondre aux mêmes objectifs qu'Ariane avec toutes les possibilités supplémentaires offertes par le logiciel support, notamment son SIG.

Ces objectifs sont ceux de l'évaluation de projet, tels qu'édictée par l'instruction cadre du 25 mars 2004 relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mise à jour le 27 mai 2005 [12], et sa déclinaison route : l'instruction DGR relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains (version provisoire du 23 mai 2007) [13].

Cette démarche passe par la mise en œuvre d'un modèle d'affectation macroscopique et statique du trafic routier, dont l'objectif est de représenter le fonctionnement du système de transport au plus proche de la réalité mais de façon simplifiée.

Le modèle de trafic est utilisé afin de comparer différentes alternatives d'évolution dans le futur. On calcule les niveaux de trafics et certains indicateurs pour différents scénarii d'aménagement qui permettent d'apporter un éclairage quant à l'opportunité d'un projet d'infrastructure.

1.2 - Les modèles macroscopiques et statiques d'affectation routière

Les modèles utilisés pour évaluer des grands projets d'infrastructure routière sont des modèles dits macroscopiques et statiques. Ils permettent de représenter les flux et itinéraires des véhicules ou voyageurs sur les réseaux de transport.

Le terme macroscopique fait référence au mode de représentation des véhicules ou voyageurs, considérés comme des flux homogènes. Ils ne sont donc pas identifiables individuellement (comme dans les modèles microscopiques).

Le terme statique renvoie à la dimension temporelle de l'étude. Les modèles d'affectation statiques traitent une certaine période temporelle, considérée seulement en moyenne, donc en négligeant les variations qui dans la réalité surviennent au cours du temps. À l'opposé, les modèles d'affectation dynamiques étudient les variations temporelles à l'intérieur d'une période donnée. Dans ces modèles, il y a des interactions locales entre les pas de temps successifs, alors que les modèles statiques étudient des périodes de temps de façon indépendante.

Dans le cadre des projets interurbains, la période retenue est l'année et on considère ainsi des Trafics Moyens Journaliers Annuels (TMJA). On notera que dans le domaine urbain, les moyennes temporelles les plus étudiées correspondent aux heures de pointe.

En outre, les modèles utilisés sont dits à contrainte de capacité. En effet, l'offre représentée par des sections de routes homogènes, est soumise à la congestion : les temps de parcours se dégradent quand la circulation s'intensifie. Cette prise en compte se fait par l'intermédiaire de courbes temps-débit (aussi appelées courbe débit-vitesse). Les flux empruntant un arc peuvent cependant dépasser le paramètre de capacité que l'on peut traduire comme le débit où la saturation apparaît. Pour plus de détails sur les courbes temps-débit, voir le § 6 du chapitre III.

1.3 - Principe de minimisation d’un coût généralisé

Le modèle d'affectation représente les choix d'itinéraires effectués par les usagers considérés comme rationnels et omniscients. Il suppose pour cela que l’usager cherche à optimiser son déplacement (ce qui n’est pas le cas d'une promenade), en choisissant l'itinéraire le plus rapide, en réduisant ses dépenses monétaires, en préférant le confort de conduite, ou encore en optant pour un itinéraire qui combine plusieurs de ces qualités. Le principe est donc de minimiser un coût généralisé de transport (ou indifféremment un temps généralisé, selon l'unité choisie) qui est l'addition de différentes composantes de coûts, de temps, de confort pour chaque chemin possible. Pour calculer le coût généralisé, il faut choisir les déterminants du choix d'itinéraires, par exemple : le temps, la distance, les coûts monétaires (carburant, entretien et dévaluation du véhicule), la pénibilité/le confort, etc.

Mais il faut garder à l’esprit que l'évaluation des caractéristiques d'un chemin reste éminemment subjective, ce qui amène parfois l'usager à emprunter un chemin qui ne semble pas optimal.

Dans le coût généralisé, la composante de temps est transformée en euros par l'intermédiaire de **la valeur du temps**. Cela correspond au prix qu'est prêt à payer l'usager pour économiser une unité de temps de déplacement. Le temps de parcours est multiplié par la valeur du temps pour être incorporé au coût généralisé.

Si dans la réalité les usagers arbitrent plus ou moins consciemment entre itinéraires en fonction de leurs différentes caractéristiques, il n'est pas évident que l'estimation de l'attrait ou du coût de chaque chemin se ramène à la somme des ces composantes. C'est pourtant l'hypothèse simplificatrice qui est faite dans les modèles de trafic.

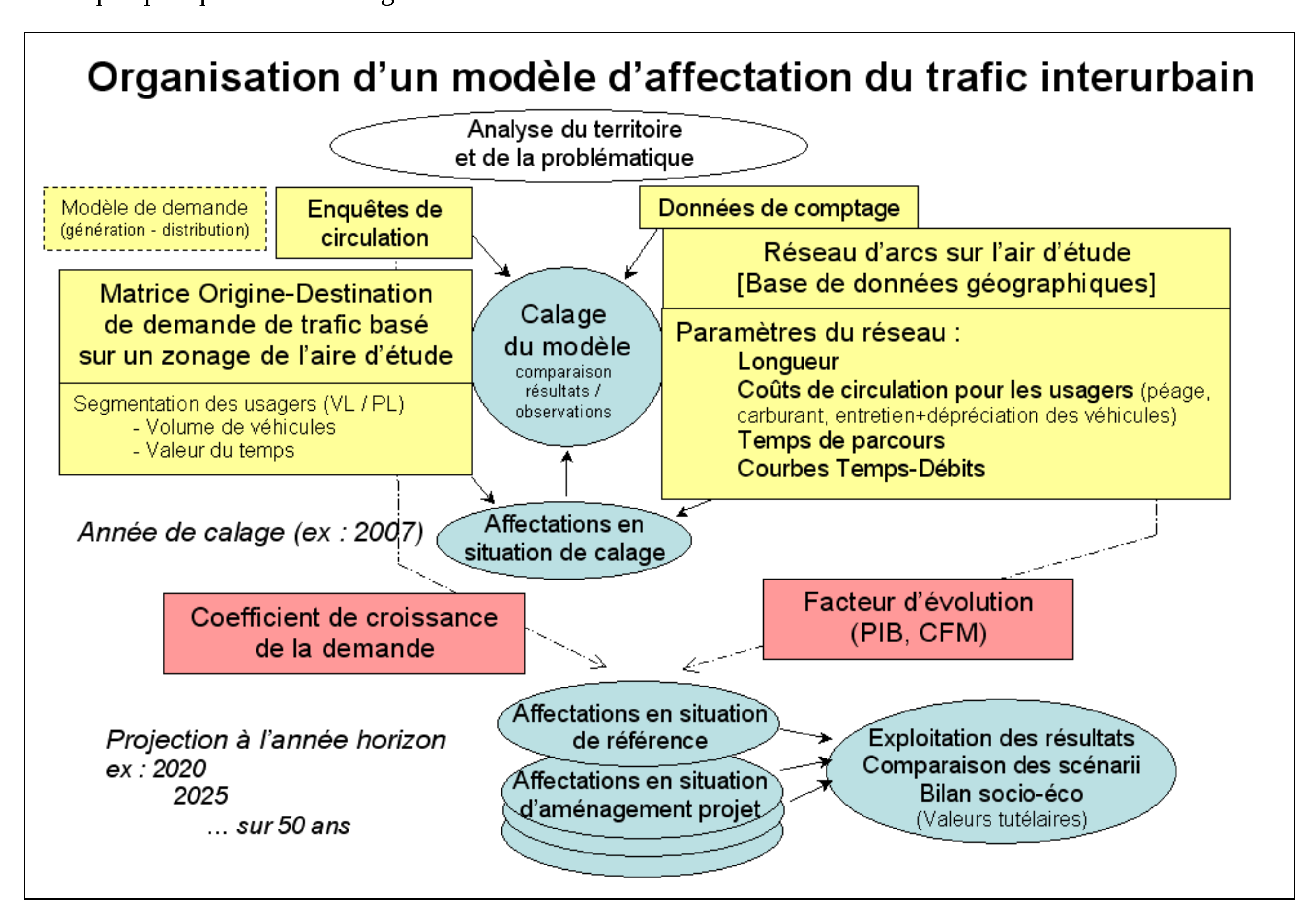
Après avoir défini la fonction de coût généralisé, il existe différents types de loi d'affectation. La loi la plus basique, appelée "tout ou rien", affecte tout le trafic sur l'itinéraire de coût généralisé minimum. Les principes de répartition du trafic de la loi d'Abraham et de la loi prix-temps, présentés dans le chapitre III, se basent également sur le principe de minimisation du coût généralisé des usagers.

De plus, quelle que soit la loi d'affectation choisie, la prise en compte de la congestion sur les arcs permet de définir un état d'équilibre entre l'offre et la demande de transport, comme cela sera introduit au § 3.

1.4 - Organisation d'une étude de projet d'infrastructure interurbaine

Les deux outils ici à l'étude sont basés sur les mêmes grands principes de modélisation et d'évaluation, même s'ils diffèrent sur certains points techniques ou parfois simplement sur du vocabulaire.

Le schéma ci-dessous représente les différentes composantes d'une étude de projet interurbain. Ce schéma est identique quel que soit l'outil logiciel utilisé.



Dans ce schéma, on trouve tout d'abord dans les rectangles jaunes les étapes de construction des bases de données utilisées dans le modèle de trafic : à droite l'offre de transport, à gauche la demande de transport. La section suivante détaille les méthodes de représentation de ces données d'entrée du modèle.

Ensuite l'affectation avec toutes ses composantes puis le calage du modèle sont abordés, avant de présenter les principes de l'exploitation du modèle avec les projections en situation future (rectangles rouges), et enfin l'évaluation socio-économique.

2 - Méthodes de représentation des données d'entrée

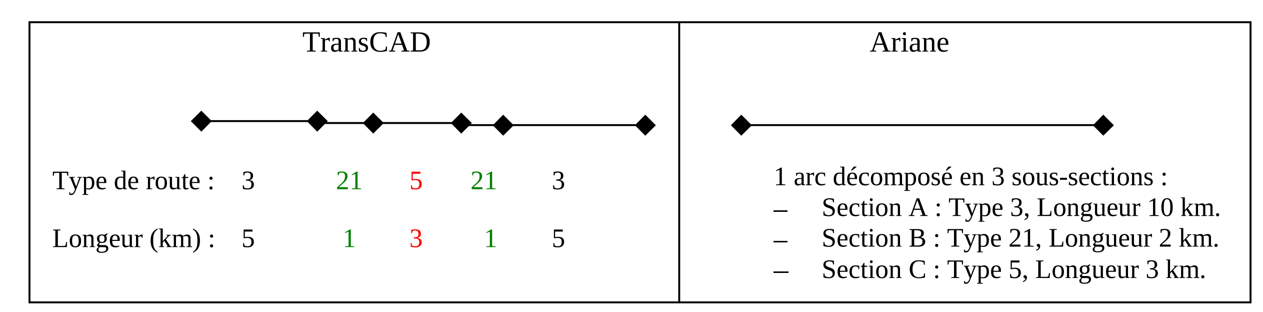
2.1 - Représentation de l'offre de transport

Dans les outils à l'étude, l'offre de transport est représentée par le réseau routier, composés d'arcs (ou arrêtes dans Ariane), dont les caractéristiques sont principalement paramétrées à partir de types d'arcs prédéfinis (par exemple, les autoroutes concédées à 2x2 voies, les routes bidirectionnelles de 7m, …). La table des types de routes (environ une trentaine) s'appelle la table de typologie (la table Setra_VDF pour les modules Sétra, en Annexe 4). La typologie des arcs est restée quasiment invariante entre les logiciels Ariane et les modules Sétra de TransCAD. Les modules Sétra offrent néanmoins une plus grande souplesse et permettent d'introduire de nouveaux types d'arcs, si l'utilisateur en a l'utilité.

Dans Ariane, le nombre d'arêtes est limité à 2 500. En tenant compte des niveaux d'aménagements, le nombre d'arêtes est limité à 5 000. Cette limite peut paraître élevée, mais il a été nécessaire d'adapter le programme dans le cadre de l'étude France entière 2015, où cette limite a été dépassée.

Un arc se décompose en sous-sections dans Ariane, chacune d'elles étant définie avec un type de route et une longueur. Les arcs sont donc définis entre deux points de choix du réseau.

Principe de représentation des arcs :



Le principe des sous-sections a l'avantage de réduire le nombre d'arcs, mais il demande en contrepartie un travail de codage plus fastidieux. TransCAD permet de visualiser et de vérifier le codage des arcs de façon plus aisée. Il permet également d'importer dans l'interface des réseaux déjà codés, notamment des SIG routiers (bases IGN, TeleAtlas, Navteq, …).

Dans TransCAD, il n'y pas de limite numérique au nombre d'arcs, mais comme avec Ariane, celui-ci conditionne d'une part les temps de calcul, et d'autre part le temps de travail. Ce dernier croît rapidement avec le nombre d'arcs, avec le nombre de caractéristiques, d'itinéraires à vérifier, de résultats d'affectation à contrôler.

Cela étant, le principe de codage des arcs n'a aucune influence sur les calculs d'affectation. L'apport de TransCAD sur cet aspect est donc ergonomique pour l'utilisateur.

2.2 - Représentation de la demande de transport

Dans les deux outils, la demande de transport est représentée par des flux en Véhicules Légers (VL) et Poids Lourds (PL) devant s'écouler entre des points du réseau : depuis un point Origine vers un point Destination, pendant une période donnée (en interurbain, il s'agit du TMJA : Trafic Moyen Journalier Annuel). La demande est en fait agrégée selon un découpage en zones (le zonage), chacune étant représentée par un point appelé centroïde de zone, servant d'origine ou de destination aux flux.

Dans TransCAD, ces flux sont stockés dans des matrices OD, sous forme de tableaux, à partir desquels de nombreux calculs matriciels sont possibles.

Dans Ariane, la demande de trafic est représentée sous la forme d'une liste de relations définissant les arêtes parcourues. Bien que la représentation formelle de cette demande diffère, car il n'y a de définition ni des origines, ni des destinations, le concept sous-jacent de représenter les flux VL/PL voulant relier une zone Origine à une zone Destination est le même. Cependant, il est possible de définir plusieurs relations pour une même OD, et donc aussi de forcer l'affectation (ce qui peut être utile pour le calage mais également une source de biais). Il faut aussi noter que le programme vérifie la continuité des arêtes dans la description de l'itinéraire. Le nombre de relations est limité à 2 500 et ce nombre avait déjà été dépassé dans le cadre de l'étude France entière 2015 réalisée entre 1995 et 2000.

La demande de transport est établie préalablement à toute étude de simulation, et la méthode d'élaboration de cette demande n'a pas évolué avec le passage d'Ariane à TransCAD. En effet, elle est quasiment systématiquement élaborée à partir d'enquêtes OD réalisées par interview des conducteurs aux bords des routes.

Par opposition, les autres méthodes d'élaboration de la demande, généralement utilisées dans les modèles urbains par exemple, font appel à un modèle de demande composé des étapes de génération et de distribution des déplacements entre les OD, et souvent aussi d'une étape de choix entre différents modes de transports (d'où leur dénomination de modèles à quatre étapes en comptant celle de l'affectation). Ces étapes sont réalisables avec TransCAD en dehors des modules Sétra, elles ne le sont pas avec Ariane.

2.3 - Représentation des trafics locaux

Dans les deux logiciels, on peut ajouter aux arcs des pré-chargements (ou trafics locaux) qui correspondent à des véhicules dont la distance de déplacement est courte, depuis et vers l'intérieur d'une même zone (d'où leur appellation trafics locaux). Ils peuvent également correspondre à des véhicules dont on sait qu'ils empruntent le réseau (d'après les comptages) mais qui n'ont pas été enquêtés.

Ces flux peuvent ainsi être pris en compte dans la charge de trafic par arc pour le calcul des temps de parcours : les omettre revient à surestimer les vitesses en charge, c'est-à-dire à sous-estimer les temps de parcours.

Pour une section donnée, les pré-chargements sont généralement obtenus par la différence entre les flux modélisés par arc, et le flux total connu à partir des données de comptages de trafic.

On fait l'hypothèse que ces trafics locaux sont captifs de leur itinéraire, ils n'apparaissent donc pas dans la matrice OD mais directement au niveau des arcs du réseau, afin d'être pris en compte dans le niveau de service du réseau via les calculs de temps de parcours.

Dans TransCAD, pour représenter ces trafics locaux, on utilise des champs par arc définis au niveau du réseau dans la base de données d'offre.

Dans Ariane, ils sont représentés de la même façon que les autres relations OD : ce sont des relations depuis une arête vers la même arête. Le modélisateur a la possibilité d'utiliser des codes spécifiques pour les différencier, mais cette représentation ne permet pas à une autre personne de bien distinguer les trafics locaux des trafics qui s'affectent réellement sur le réseau (ceux qui ont la possibilité de choisir un autre itinéraire). Ce mode de représentation nuit à la transparence de l'étude de trafic, d'autant plus que les trafics locaux peuvent avoir une grande influence sur les résultats.

En effet, plus il y a de pré-chargements sur un itinéraire, plus les usagers vont se reporter sur les itinéraires alternatifs, comme le projet étudié par exemple. Mais encore, plus il y a de pré-chargements, plus les vitesses en charge sont faibles, et plus les gains en temps de parcours liés à l'amélioration du réseau sont importants. Enfin, les trafics locaux bénéficient eux aussi des gains en niveau service, et viennent ainsi améliorer le bilan socio-économique des projets. Ces trois facteurs liés à l'ajout de pré-chargements jouant dans le même sens au niveau du bilan, il est important que l'étude de trafic soit transparente sur ce point. Pour cela, on recommande que toute étude de trafic donne une représentation cartographique des volumes de trafics pré-chargés sur le réseau.

Sur ce point, on note que les outils de représentation cartographique dans TransCAD permettent de réaliser ces cartes très simplement.

3 - Des composantes communes aux modèles d'affectation du trafic

Afin de comparer les deux outils, il est nécessaire d'identifier les différentes composantes théoriques d'un modèle de trafic, exposées par Fabien Leurent [8] de la manière suivante :

- le processus de sélection des chemins, qui tient compte des informations disponibles aux auteurs des déplacements ;
- la règle de répartition du trafic entre itinéraires concurrents (la loi d'affectation) ;
- la loi de fonctionnement des infrastructures et de leur niveau de service, par exemple les temps de parcours en fonction de la demande de transport (3.2 - les courbes temps-débit) ;
- la dépendance de la demande vis-à-vis du niveau de service (3.3 l'élasticité de la demande).

La convention Sétra-Inrets sur la comparaison de deux principes d'affectation [8] traitait essentiellement de la règle de répartition du trafic entre itinéraires concurrents. Il concluait à la relative égalité entre les deux lois d'affectation. Les autres questions y ont été abordées du point de vue théorique seulement. Tous ces mécanismes et leurs paramétrages seront analysés dans cette étude.

Par ailleurs, la mise en place d'un modèle de trafic nécessite des travaux de paramétrage de l'affectation et d'adaptation des données d'entrée afin que le modèle reconstitue au mieux la situation actuelle. C'est le calage du modèle, dont la convention [8] ne traitait qu'au travers des valeurs du temps d'affectation (cf § 3.4). Le paragraphe 3.5 traite de l'exploitation du modèle et en particulier de la réalisation de bilans socio-économiques.

Pour toutes ces composantes des modèles, les possibilités offertes par le logiciel (en termes d'outils, d'interface, de paramétrage possible, …) sont au moins aussi importantes que les principes de modélisation qui y sont implémentés. Cette section étudie ainsi chacune des composantes des modèles du point de vue théorique, mais aussi la façon dont elles sont mises en pratique.

3.1 - Principe de l'affectation

Comme introduit au paragraphe 1.2, les modèles macroscopiques et statiques d'affectation routière confrontent la demande avec l'offre de transport.

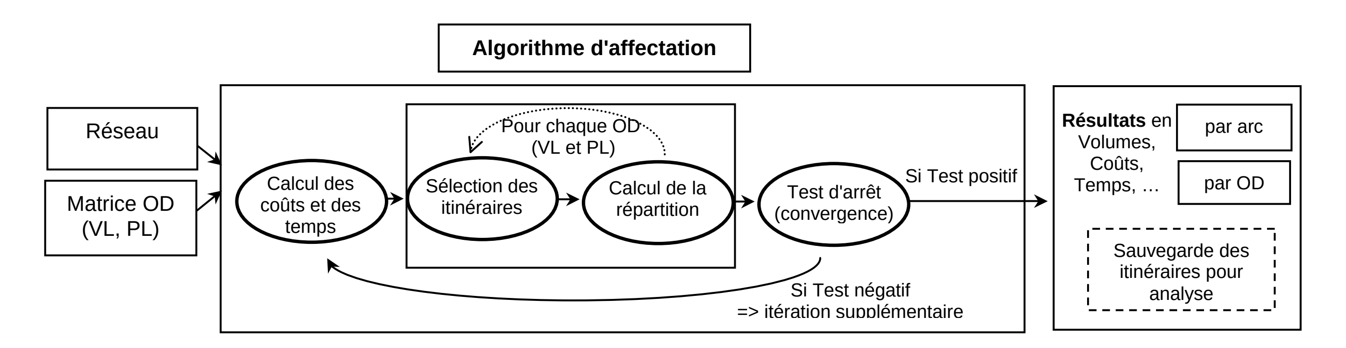
La loi d'affectation définit un équilibre, c'est-à-dire un état stable soumis à des forces qui se contrebalancent. Les forces en question sont d'une part la pression de la demande, et d'autre part la réaction de l'offre (via la croissance des temps de parcours en fonction du débit supporté). La caractérisation de l'équilibre de Wardrop correspond à un état où aucun usager n'a d'intérêt à changer d'itinéraire. Dans cet état, tous les chemins empruntés ont leur coût généralisé égaux entre eux et minimaux par rapport aux itinéraires non empruntés. Il existe différentes lois de répartition qui aboutissent à des solutions différentes pour l'état d'équilibre, notamment : équilibres stochastiques (comme la loi d'Abraham) ou encore l'équilibre prix-temps.

Ces deux modèles sont basés sur le principe d'équilibrage entre les itinéraires concurrents. En effet, avec la prise en compte de la charge du réseau, la répartition du trafic résulte d'un équilibrage entre la demande et l'offre.

Alors que le modèle prix-temps est déterministe (pour des caractéristiques données, on connaît le choix de tous les usagers), on fait l'hypothèse avec la loi d'Abraham que les usagers font des erreurs de perception dans les paramètres du choix d'itinéraire, c'est le principe des modèles dit stochastiques. Il est possible d'utiliser le modèle prix-temps en introduisant un biais de perception : l'aléa, implémenté dans les modules Sétra. Cet aspect n'est cependant pas traité dans le document.

Pour plus de détails sur ces lois d'affectation, on renvoie le lecteur vers le chapitre III.

Le schéma ci-dessous montre les principes du calcul de l'affectation à l'équilibre.



Chacun des deux logiciels utilise une loi de répartition entre itinéraires concurrents basée sur le principe fondamental de minimisation d'un coût généralisé pour les usagers considérés comme rationnels. Le coût généralisé est la somme du coût de déplacement et du temps de parcours multiplié par la valeur du temps :

G = Prix + Temps x Valeur du Temps

Dans les deux logiciels, les calculs sont différenciés pour les VL et les PL. Le temps de parcours dépend des courbes temps-débit et de la charge de trafic, et les coûts de circulation, se décomposent comme suit :

- coût kilométrique d'entretien des véhicules ;
- coût kilométrique de dépréciation des véhicules ;
- coût de consommation de carburant ;
- péages ;
- malus d'inconfort (pour les VL uniquement).

Dans TransCAD comme dans Ariane, pour chacun de ces coûts, il est possible de définir des valeurs au niveau de chaque arc. Si aucune valeur n'est définie au niveau de l'arc, alors celui-ci prend la valeur par défaut qui est indiquée dans la table de typologie.

La principale différence entre les deux modèles concerne la valeur du temps : c'est une constante pour la loi d'Abraham, alors que dans l'affectation Prix-Temps, il s'agit d'une distribution continue des valeurs du temps. Les différences entre les deux lois d’affectation sont explicitées au chapitre III.

Une autre différence importante entre les deux logiciels se situe au niveau de la méthode de sélection des itinéraires concurrents : elle est manuelle dans Ariane (c'est-à-dire que l'opérateur indique au logiciel pour chaque liaison OD les différents itinéraires envisageables), alors que TransCAD utilise des méthodes de recherche automatique. Ces différences seront étudiées dans la section 3 du chapitre III.

Les calculs s'effectuent pour un nombre d'itérations paramétrable, et pour plus de détails sur le critère de convergence qui permet de vérifier que l'équilibre est atteint, on renvoie le lecteur au paragraphe 7 du chapitre III.

3.2 - Courbes temps-débit

Les courbes temps-débits servent à calculer les temps de parcours en fonction de la charge de trafic sur les arcs (le débit). Elles utilisent divers paramètres tels que le temps de parcours à vide (correspondant à la vitesse libre), la capacité (ou débit de saturation), les facteurs de concentration et d'autres paramètres qui dépendent de leur formulation. Elles sont calibrées pour différents types de routes, à partir de recueils nationaux de données de débit et de vitesse sur une sélection de routes représentatives.

Afin de rendre compte de l'hétérogénéité des temps de parcours au cours de la journée et en fonction des saisons, l'ajout de paramètres est nécessaire pour obtenir un temps de parcours moyen annuel à partir d'un débit moyen annuel. Dans Ariane, ces paramètres sont les Phi_VL et Phi_PL. Dans les modules Sétra, ce sont les facteurs de concentration Khi_VL et Khi_PL. Ces deux notions sont tout à fait différentes, et difficilement comparables. Pour plus d'informations, on renvoie le lecteur vers la note concernant le calcul des facteurs de concentration [18].

Dans les modules Sétra de TransCAD, les facteurs de concentration sont indiqués au niveau de la table de typologie des arcs, mais il est aussi possible de paramétrer des valeurs spécifiques au niveau des arcs différentes des valeurs moyennes nationales. Alors que cela n'est pas possible par défaut dans Ariane. Cela va dans le sens d'une plus grande adaptabilité des études de trafic au contexte local.

La formulation des courbes temps-débit a été complètement revue lors du passage d'Ariane à TransCAD. Pour plus de détails, sur les différences entre les courbes temps-débit d'Ariane et celles de TransCAD, voir le chap III § 6.

3.3 - Élasticité de la demande

Pour les grands projets d'infrastructures, on estime les trafics sur le projet en prenant en compte la demande élastique, c'est-à-dire la demande additionnelle (ou en moins) liée à l'amélioration (ou à la dégradation) des conditions de circulation.

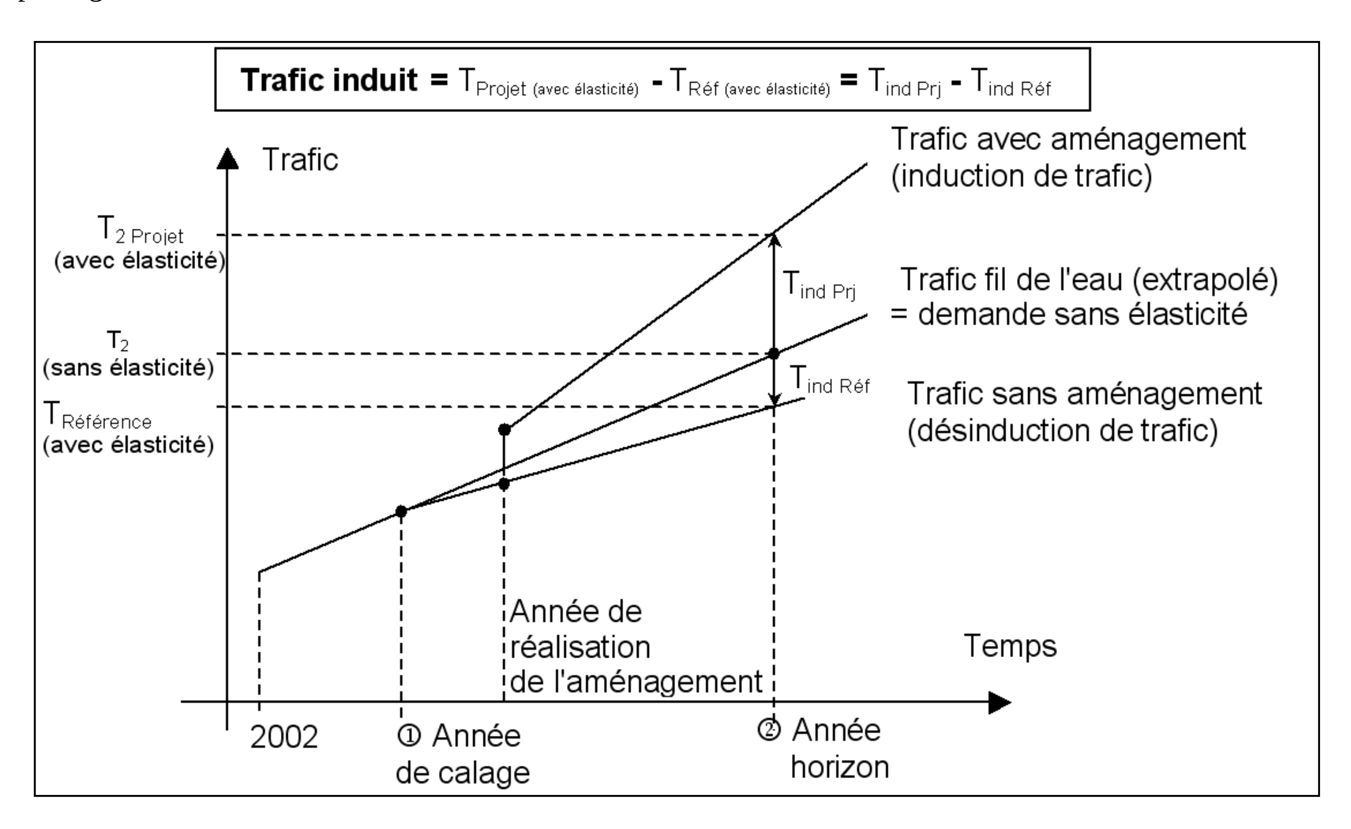
Le principe de calcul d'une demande de transport élastique traduit le fait que le coût de circulation a non seulement un impact sur le choix des itinéraires empruntés par les usagers mais également sur le volume global de déplacements entre deux zones.

On appelle **trafic induit** la nouvelle demande de trafic conséquente aux modifications du réseau et aux évolutions des coûts généralisés sur les différents itinéraires. Dans le paramétrage actuel qui date des périodes de fort développement de l'utilisation de la voiture particulière, le trafic induit est en partie composé de trafic qui se reporte depuis les autres modes de transports ou depuis d'autres axes hors de la zone d'étude. De plus, il comprend certains déplacements qui n'avaient pas lieu avant la réalisation du projet et qui sont observés après sa réalisation (ce qu'on appelle parfois **trafic induit pur**).

Il faut noter que dans le cas d'une augmentation des trafics à réseau constant, la dégradation des conditions de circulation implique une augmentation des coûts généralisés, et donc une baisse de la demande de trafic. Ce trafic est appelé **trafic désinduit**.

On parle de **trafic avec demande élastique** pour englober à la fois le trafic induit et le trafic désinduit.

Pour évaluer le trafic induit lié uniquement au projet, **il faut comparer les résultats de trafics entre l'affectation de projet avec demande élastique et l'affectation de référence avec demande élastique.** Le trafic induit par le projet doit être estimé par OD sur une coupure plutôt que par arc, car l'ouverture d'un projet peut également induire du trafic sur l'ancien itinéraire.



Dans les deux logiciels, la même méthode d'estimation du trafic induit a été implémentée. On fait l'hypothèse que la relation suivante lie demande de trafic *T* et coût généralisé de transport *G* entre la situation de calage 1 (à l'année de mesure des trafics) et la situation à l'année horizon 2 :

$$\frac{T_{2\,(avec\ élasticité)}}{T_{2\,(sans\ élasticité)}} = \left(\frac{G_{2\,(avec\ élasticité)}}{G_1'{}_{(sans\ élasticité)}} \right)^{\beta}$$

avec β négatif, dont la valeur préconisée (paramétrable dans les modules Sétra) est -2/3.

Le coût généralisé de transport prend en compte les dépenses monétaires (coût de maintenance, dépréciation, carburant, péage, malus, …) et également le coût du temps monétarisé sur la base de la valeur du temps VL ou PL. Avec l'augmentation des revenus et du PIB dans le temps, la valeur du temps augmente et le coût généralisé de transport également. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, l'application de la formulation précédente entre deux situations 1 et 2 ayant vu une augmentation de la valeur du temps entre 1 et 2 conduirait mécaniquement à une réduction de la demande de transport. Cet exemple montre donc que la comparaison des coûts généralisés pour le calcul de la demande élastique et du trafic induit doit être réalisée à valeur du temps constante. Le coût généralisé de la situation 1 est donc calculé avec la valeur du temps et le malus à l'année horizon 2 (d'où la notation du coût G_1' avec un prime).

Le coût généralisé par OD doit tenir compte des différents chemins choisis. C'est donc une moyenne sur les itinéraires empruntés pondérés par la répartition du trafic entre ces itinéraires.

Tous ces principes sont identiques dans les deux logiciels à l'étude. Cependant, lors du développement des modules Sétra de TransCAD, le calcul de la moyenne du coût généralisé par OD a nécessité des adaptations par rapport à la méthode de calcul initialement envisagée afin d'assurer la bonne convergence de l'algorithme. La

demande élastique est calculée à partir de la méthode des moyennes successives, et une affectation supplémentaire peut être lancée afin d'obtenir une répartition du trafic induit identique au trafic extrapolé.

Cette formule générale basée sur le ratio des coûts généralisés moyens n'est pas la seule possibilité dans TransCAD pour estimer les trafics induits, et en particulier ceux qui proviennent des autres modes de transport : les reports modaux peuvent être estimés à partir d'un modèle de choix modal si l'on dispose de données suffisantes sur les autres modes de transport. En outre, les trafics induits issus de report d'itinéraires lointains ou non modélisés peuvent avec TransCAD être modélisés directement dans la mesure où le logiciel n'est pas limité en puissance de calcul.

3.4 - Calage du modèle

Dans la construction d'un modèle de déplacements, le calage du modèle est une étape essentielle qui consiste à ajuster les données d'entrée et les paramètres du modèle afin qu'ils représentent au mieux une situation telle qu'elle est observée. Pour cela, on confronte les résultats du modèle aux données observées. En théorie, on doit séparer les données en deux parties, la première étant utilisée pour paramétrer le modèle (le calibrage), la deuxième devant servir à valider le modèle (la validation).

L'objectif est que le modèle reflète de façon simplifiée les comportements observés en prenant en compte les phénomènes explicatifs de ces comportements, afin d'exploiter ensuite ce modèle en réalisant des prévisions de trafic.

Pour le calage des modèles d'affectation, les données observées et modélisées à comparer sont les suivantes :

- volume de trafic par section ;
- temps de parcours ;
- répartition entre itinéraires concurrents.

Dans le cadre de l'évaluation des projets interurbains, on modifie rarement les données sur la demande de trafic issues des enquêtes, le calage se concentrant surtout sur des corrections apportées au réseau. Concrètement, les modélisateurs ajustent :

- le nombre et la position des points d'injection de la matrice OD (zonage et centroïdes de zones) ;
- les paramètres d'affectation (calibrage de la valeur du temps) ;
- le niveau de description du réseau et les caractéristiques de coût et de temps de parcours des arcs (type de route, malus, vitesse à vide, capacité, …) ;
- les trafics locaux.

On mesure les écarts entre les résultats du modèle et les données observées, puis des corrections sont apportées afin de réduire les écarts les plus importants, en commençant par des ajustements globaux (comme sur la valeur du temps ou sur la table de typologie) et en allant vers des modifications de plus en plus locales (au niveau des arcs).

Parce qu'il existe plusieurs possibilités de modifications pour réduire les écarts entre le modèle et les observations, il n'existe pas de méthode automatique permettant de faire ces ajustements. C'est ici que le modélisateur apporte une grande valeur ajoutée au modèle, car il réalise les modifications les plus pertinentes à partir de sa connaissance de la zone d'étude. Le calage du modèle dépend ainsi essentiellement des techniques employées par le modélisateur.

Dans TransCAD, de nombreux outils constituent une aide précieuse au calage des modèles. Les outils de gestion des bases de données simplifient la comparaison entre les données observées et les résultats du modèle. Son SIG permet de confronter le réseau modélisé avec n'importe quelle autre base de données géoréférencées (les photos aériennes par exemple). Les outils de représentation cartographique permettent de visualiser les écarts, et ainsi de déterminer les points d'amélioration du modèle. Il intègre également de nombreux outils de calculs statistiques qui permettent d'analyser les bases de données, de calculer des indicateurs et de suivre l'amélioration de la qualité du modèle.

Grâce à toutes ces possibilités qui n'existent pas dans Ariane, le passage à TransCAD permet d'améliorer les techniques de calage et la qualité de prévision des modèles.

De plus, les facilités de paramétrage et de lancement de calculs d'affectation avec les modules Sétra permettent d'estimer la sensibilité des résultats à divers paramètres (péages, valeur du temps, …) et de s'assurer de la robustesse du modèle en vue de son exploitation. On accède ainsi à la validation du modèle via des tests de sensiblité.

Afin d'aller plus loin sur ce sujet, le Sétra a monté un groupe de travail sur le calage et la validation des modèles.

4 - Exploitation du modèle de trafic interurbain

4.1 - Projections de la matrice de demande

Si l'on regarde les séries temporelles de données de trafic sur le long terme, on observe que le volume de la demande de transport croît linéairement dans le temps. Le service statistique du ministère (anciennement le SESP - Service des Études Statistiques et Prospectives, aujourd'hui le SOeS - Service de l'Observatoire et des Statistiques) fournit des coefficients de croissance à l'échelle nationale, en fonction du Produit Intérieur Brut (PIB) et de la Consommation Finale des Ménages (CFM). Ces coefficients sont utilisés afin de projeter la demande de trafic dans le futur, aux diverses années horizon étudiées.

L'instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport [12] précise qu'il est possible d'utiliser des coefficients de croissance différents des taux nationaux, lorsque ces hypothèses sont jugées trop globales à l'échelle du projet étudié.

L'annexe 5 de l'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains [13] précise les coefficients pour 3 scénarios de croissance du PIB (1.5, 1.9 et 2.3) et pour 3 hypothèses (basse, moyenne, haute). On distingue les coefficients de croissance pour les PL et 2 classes de VL (les déplacements > ou < à 20 km).

La circulaire de 1998 [11] distinguait 3 classes de VL (< 20 km, entre 20 et 100 km, >100 km) et 3 classes de PL (interne à la France, échange international, transit international).

Ces hypothèses de croissance définies par les textes réglementaires sont des paramètres extérieurs aux modèles de trafic. Les deux outils à l'étude permettent de prendre en compte différents scénarii de croissance. On considère donc que la croissance des trafics est en dehors du champ de la comparaison entre les deux logiciels. Dans le cadre de cette étude, on s'est simplement assuré d'utiliser des hypothèses identiques dans les comparaisons.

Comme pour la grande majorité des études réalisées ces dernières années, le scénario retenu est l'hypothèse moyenne du scénario central de croissance (PIB 1.9 %) :

Scénario central de croissance du PIB - Hypothèse Moyenne			
Taux de croissance linéaire du trafic Avec année de base 2002.	VL relations < 20 km	VL relations > 20 km	PL
De 2002 à 2025	1,25 %	2,1 %	1,5 %
De 2025 à 2050 (la moitié des taux indiqués ci-dessus)	0,625 %	1,05 %	0,75 %
Au-delà de 2050	0 %	0 %	0 %

Ceci correspond en moyenne nationale à 1,8 % de croissance pour l'ensemble du trafic, 1.9% pour les VL et 1.5% pour les PL.

Le scénario macro-économique retenu pour l'évolution des valeurs tutélaires correspondant à ces prévisions de trafic est le suivant :

Taux géométriques par an	2000-2025	2025-2050	Au-delà de 2050
PIB	1,9 %	1,5 %	0,0 %
CFM par tête	1,4 %	1,3 %	0,0 %

4.2 - Gestion des scénarii d'évolution du réseau

Afin de réaliser l'évaluation d'un projet, il est nécessaire de comparer différentes situations d'aménagements. Une situation d'aménagement est définie par des choix concernant :

- les opérations d'aménagements réalisées sur le réseau (ajout ou modification d'arc du réseau) ;
- la réglementation (interdiction de circulation, mise en place de péage, …) ;
- et pour chacune de ces possibilités, les années de mise en service.

Il est en effet nécessaire de pouvoir tester plusieurs années de mise en service si l'on veut par exemple évaluer la date optimale de mise en service d'une infrastructure ou encore l'ordre optimal dans lequel effectuer un séquencement d'opérations.

En raison des innombrables opérations possibles sur un réseau, ainsi que leurs combinaisons pour former les situations d'aménagement, la gestion des scénarii est d'une grande importance dans la réalisation d'une étude d'évaluation de projet.

Dans Ariane, on définit plusieurs états du réseau qui correspondent à des ensembles d'aménagement des arêtes. Cependant, le nombre d'états du réseau est limité à 100, et surtout, un état du réseau est figé dans le temps. De plus, en cas d'importante modification du projet (par exemple l'ajout d'un échangeur) il est nécessaire de redéfinir un ou plusieurs itinéraires passant par le projet pour toutes les relations susceptibles de l'emprunter. Ceci a des conséquences importantes en terme de réactivité pour la production des résultats.

Dans les modules Sétra de TransCAD, on définit des opérations qui sont les éléments de base d'un aménagement du réseau : ouvertures et/ou fermetures d'arcs et/ou modifications d'une ou plusieurs caractéristiques des arcs. Pour chaque opération, dont le nombre n'est pas limité, on définit un coût et un échéancier de réalisation.

On définit ensuite les scénarii d'aménagements en paramétrant une série d'opérations et en attribuant à chacune une année de mise en service. Ces définitions permettent d'avoir un état du réseau qui évolue dans le temps. La gestion des opérations et des scénarii d'aménagements avec les modules Sétra de TransCAD permet ainsi de définir toutes les situations d'aménagements possibles et imaginables, de manière relativement simple.

A partir de ces éléments, on peut notamment définir des situations à comparer (celle de projet et celle de référence pour l'évaluation de projet), en créant les scénarii d'aménagement correspondant.

4.3 - Bilan socio-économique

4.3.1 -Objectifs

L'évaluation d'un projet de transport est complexe car elle doit aborder les différentes composantes sociales, techniques, environnementales et économiques du projet. Pour choisir le meilleur projet, il est nécessaire de disposer d'outils d'aide à la décision intégrant l'ensemble de ces éléments et garantissant une analyse globale des effets.

Le calcul socio-économique cherche à répondre à cette attente. Il met en parallèle, à l'aide d'une unité monétaire homogène, les avantages économiques sociaux et environnementaux d'un projet, et ce dans le but de quantifier la variation d'utilité collective qu'il génère tout au long de sa durée de vie. Le calcul socio-économique assure donc un éclairage global rigoureux sur les effets d'un investissement dans la mesure où ces derniers peuvent être mesurés sur une échelle monétaire. Fondé sur des critères communs, il vise l'objectivité et la transparence de l'évaluation. Appliqué à tous les projets d'investissements, il constitue un socle homogène à partir duquel projets et variantes peuvent être comparés.

Le calcul socio-économique ne saurait à lui seul dicter le choix des projets, il représente une des composantes de la palette d'outils d'aide à la décision dont disposent les décideurs et doit être complété par des analyses qualitatives des effets des projets sur le territoire, le paysage, ...

Quel que soit l'outil utilisé pour réaliser les calculs, le bilan socio-économique d'un projet a pour objectif de fournir une évaluation monétarisée des impacts quantifiables d'un projet. L'évaluation socio-économique repose sur deux grands principes :

- la comparaison des impacts quantifiables d'une situation de projet à ceux d'une situation de référence, appelée aussi bilan coûts-avantages ;
- la prise en compte de la préférence pour le présent par rapport au futur : c'est l'actualisation.

L'évaluation socio-économique comporte aussi des calculs d'indicateurs qui aident le décideur à choisir entre plusieurs projets. En effet, l'étude prévisionnelle de trafic permet de projeter aux divers horizons de la situation de référence et des scénarios d'aménagement, les principaux indicateurs concernant :

- les volumes et la structure des trafics ;
- les temps de parcours ;
- les niveaux de saturation ;
- la sécurité ;
- l'environnement (bruit, pollution de l'air et effet de serre).

Le calcul socio-économique consiste à sommer l'ensemble des avantages et des coûts monétaires ou monétarisés d'un projet en s'efforçant d'intégrer, sur la base d'une unité monétaire homogène (euros constants), les notions financière, socio-économique et environnementale. Le calcul se fait à long terme pour refléter les effets du projet tout au long de sa durée de vie.

4.3.2 -Situation de référence et situation de projet

Pour apprécier l'utilité d'un projet en regard de ses coûts et de ses avantages, il est nécessaire de comparer la situation avec projet à la situation qui aurait prévalu sans le projet, appelée situation de référence.

On définit la situation de référence comme la situation la plus probable aux différents horizons d'étude, en l'absence de l'aménagement étudié. Elle comprend l'évolution du contexte macro-économique (PIB, CFM, prix du transport, ...) et l'évolution du système de transport (infrastructures mises en service indépendamment du projet étudié, aménagements qui auraient été effectués en l'absence de projet). Le réseau de référence n'est pas

nécessairement identique au réseau de base : des aménagements routiers ou de nouvelles autoroutes par exemple peuvent être intégrés entre le réseau de calage et le réseau de référence futur.

On définit ensuite le scénario de projet, c'est-à-dire le scénario le plus probable aux différents horizons d'étude, intégrant la réalisation du projet. Le réseau en projet est généralement défini comme le réseau de référence auquel sont ajoutés un ensemble d'aménagements (améliorations, nouvelles infrastructures) à étudier.

Il est à noter qu'il peut exister plusieurs situations de référence et de projet.

C'est au projeteur de définir la situation de référence et la situation de projet, parmi toutes les possibilités d'aménagements. Pour plus de détails méthodologiques sur les aménagements de référence et de projet, le lecteur est renvoyé vers l'instruction DGR [13].

4.3.3 -Évolution des textes réglementaires

Le cadre des études de rentabilité socio-économique des projets routiers en rase campagne est défini dans des instructions du ministère chargé des transports depuis 1963. Il a évolué de cette date à nos jours, accompagnant les politiques de choix des projets.

Cinq instructions se sont ainsi succédées depuis 1980 :

- l'instruction sur les méthodes d'évaluation des effets économiques des investissements routiers en rase campagne de mars 1980 (Direction des Routes) ;
- l'instruction relative aux méthodes d'évaluation des investissements routiers en rase campagne de 1986 (Direction des Routes) ;
- la circulaire du 3 octobre 1995 relative à l'harmonisation des méthodes d'évaluation des grands projets d'infrastructures et son instruction cadre (ministère chargé des transports) ;
- la circulaire n°98-99 du 20 octobre 1998 relative aux méthodes d´évaluation économique des investissements routiers en rase campagne et l'instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers en rase campagne de 1998 (Direction des Routes), qu'on appellera "instruction de 1998" dans cette note ;
- l'instruction cadre du 25 mars 2004 relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport (Comité des Directeurs Transport), son complément du 27 mai 2005 et sa déclinaison routière provisoire de mai 2007, on désignera l'ensemble de ces ouvrages sous le terme "instruction de 2004".

Chacune de ces instructions précise les règles à respecter pour la conduite du calcul socio-économique : la monétarisation des différents avantages, les durées de calcul, le taux d'actualisation, … ainsi que les indicateurs à utiliser pour classer les projets.

Le module de calcul socio-économique du logiciel Ariane 06 est basé sur la méthodologie préconisée dans l'instruction de 1998. En 2006, une nouvelle version du logiciel nommée Ariane 07 permettait d'intégrer les préconisations de l'instruction de 2004.

Les modules Sétra du logiciel de modélisation TransCAD, quant à eux, proposent un calcul socio-économique effectué conformément aux préconisations de l'instruction de 2004 en vigueur actuellement.

4.3.4 -Consistance des calculs économiques

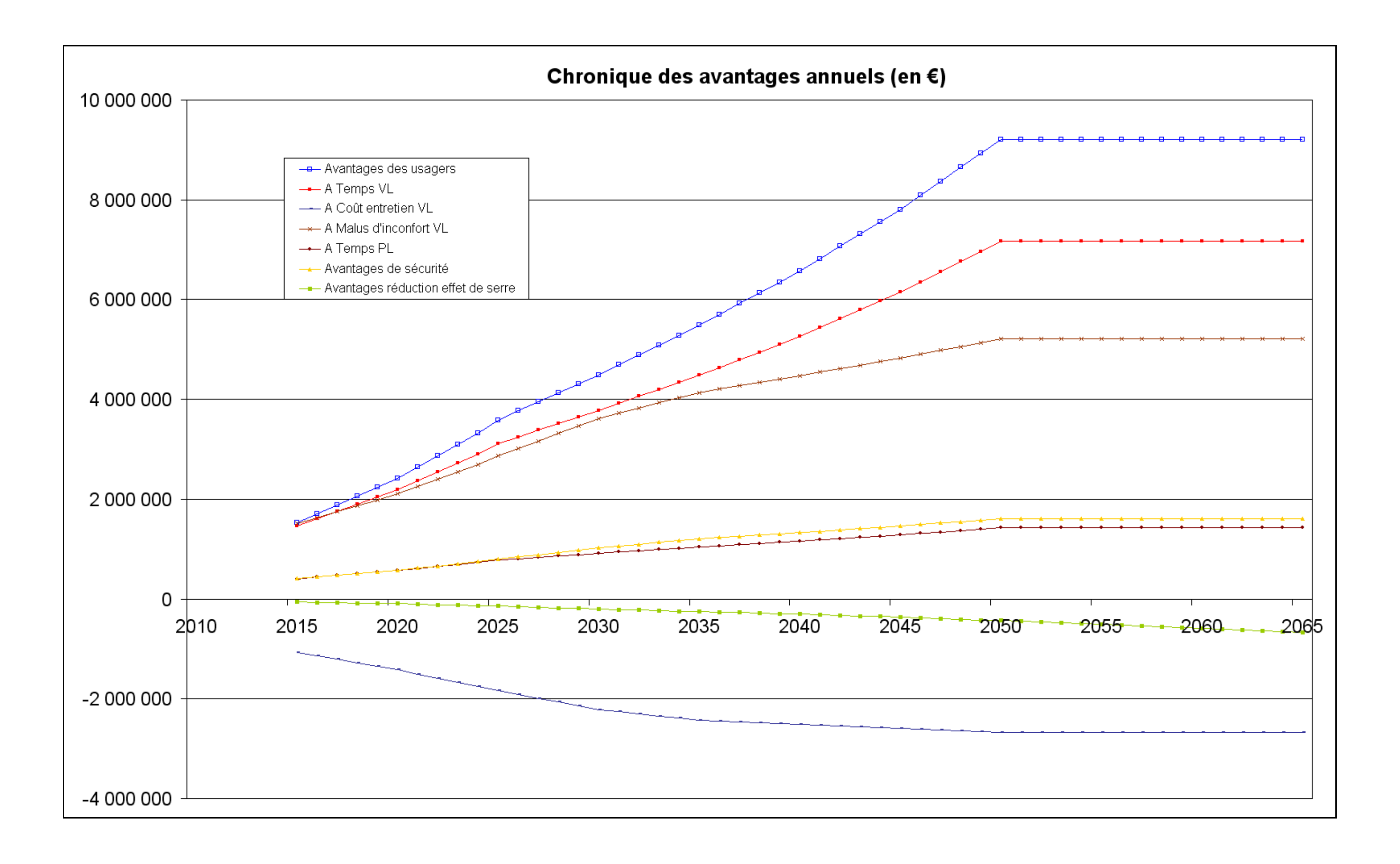
On présente ici les grands principes de la mise en œuvre du calcul socio-économique tels que définies précisément dans l'instruction DGR relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains (version provisoire du 23 mai 2007) [13]. Ceux-ci sont communs à toutes les instructions, et les différences entre les instructions 1998 et 2004 seront étudiées dans le chapitre IV.

On détermine les avantages liés à un projet pour les temps de parcours et chaque composante de coût, en calculant les différences entre la situation de projet et celle de référence.

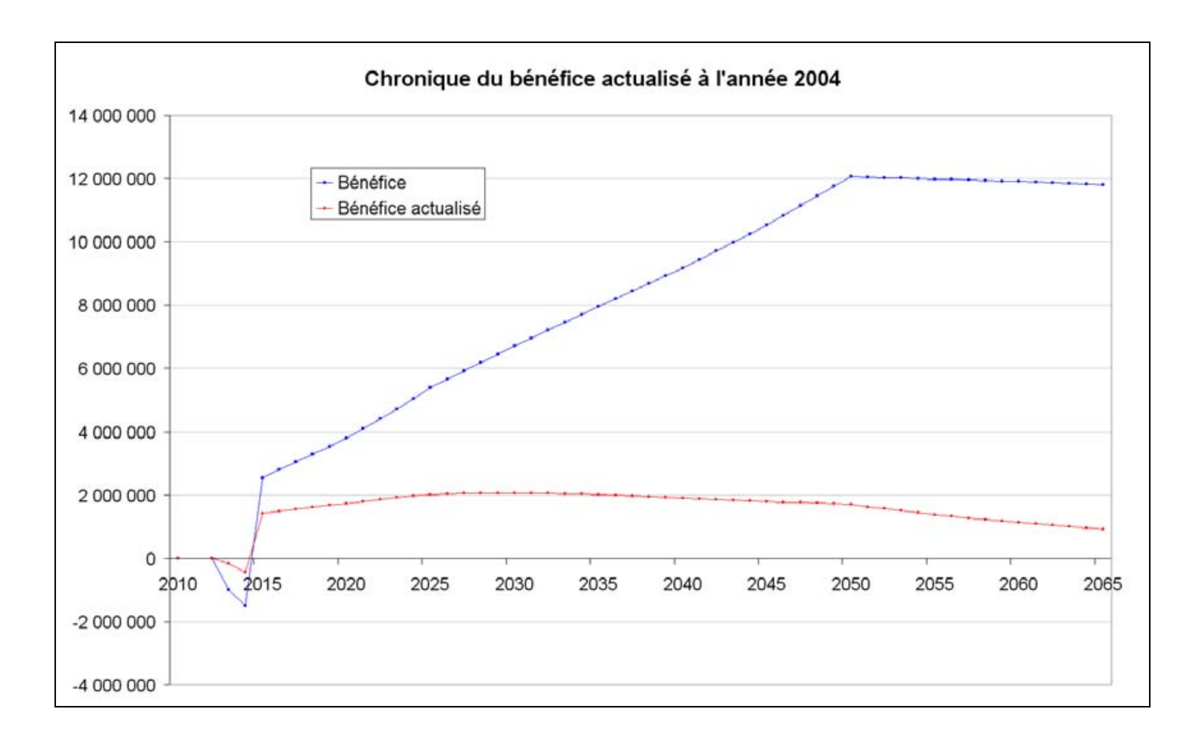
On calcule le total des temps passés sur le réseau et le total de chaque composante de coût dépensée sur le réseau, et ce pour les situations de projet et de référence. Le calcul de la différence entre les totaux donne ensuite les avantages (en temps et en coûts de circulation) liés au projet. Pour les usagers induits, on ne prend en compte que la moitié des avantages. On renvoie vers l'instruction [13] pour plus de détails sur les calculs avec demande élastique.

Afin de limiter la durée des calculs, ceux-ci sont effectués pour un nombre réduit d'années choisies au cours de la durée de vie du projet. Une fois les affectations calculées pour les différentes années sélectionnées et les avantages pour ces années évalués, un travail d'interpolation est effectué pour fournir la série chronologique complète des avantages. On établit également la série chronologique des coûts : coûts de construction, coûts d'exploitation de l'infrastructure, …

Le graphe ci-dessous illustre le calcul de ces avantages annuels.



Pour chaque année de la durée de vie du projet, les coûts et les avantages sont sommés afin d'obtenir la chronique du bénéfice annuel.



Les flux d'avantages et de coûts du projet interviennent à des années différentes de la vie du projet. Pour les sommer, il est nécessaire de les convertir à la même année à l'aide du taux d'actualisation. L'actualisation est différente de l'indexation ou de la correction de l'inflation : c'est une technique qui permet d'évaluer le changement de valeur d'un bien en fonction du moment où on le donne et reflète la préférence de la collectivité pour le présent.

Le calcul socio-économique renseigne sur les avantages par acteur. Ceci permet d'identifier les gagnants et les perdants d'un projet mais aussi d'observer les effets des projets en regard d'une politique bien précise (par exemple une priorité accordée aux infrastructures permettant d'améliorer la sécurité routière).

Usuellement, les coûts intègrent les coûts de construction, de grosses réparations, d'entretien et d'exploitation. Les avantages se partagent entre 4 acteurs :

- les usagers ;
- le concessionnaire (éventuellement, dans le cas d'une infrastructure concédée) ;
- l'État ;
- les riverains.

Certains avantages seront comptés à la fois comme des gains pour un acteur et comme des pertes pour un autre. C'est notamment le cas du péage, qui est une charge pour les usagers (c'est-à-dire une perte si la différence projet – référence est positive), mais qui est une recette pour l'opérateur de réseau concédé (c'est-à-dire un gain si la différence projet – référence est positive). C'est aussi le cas des différentes taxes et impôts. Ces variations sont des transferts qui s'annulent in fine dans le bilan pour la collectivité dans son ensemble.

Avantages des usagers

Les avantages des usagers sont constitués :

- des gains de temps : le nombre d'heures gagnées par les usagers entre la situation de projet et la situation de référence. Les valeurs du temps sont définies par des valeurs tutélaires indiquées dans l'instruction ;
- des gains de confort (pour les véhicules légers seulement) : une pénalité est ajoutée à la valeur du temps en fonction du type de route, afin de tenir compte de la notion de confort. Cette pénalité est estimée à partir de valeurs du temps révélées dans les modèles ;
- des gains de frais de fonctionnement : d'entretien et d'usure du véhicule estimés à partir des véh.km parcourus ;
- des gains sur la consommation de carburant estimés à partir des véh.km parcourus et de la vitesse sur le réseau ;
- des gains sur les frais de péage : variation de la valeur de péage payée par les usagers.

Avantages pour le concessionnaire

Pour le concessionnaire, les avantages se composent des recettes de péages (recettes de péages HT calculées sur toute la durée de vie du projet) et des variations d'impôts et taxes (taxes d'aménagement du territoire, redevance domaniale, impôt sur les société, taxe professionnelle).

Avantages pour l'État

Les avantages de la puissance publique se composent :

- de l'effet de serre : les émissions de gaz à effet de serre sont directement proportionnelles à la consommation de carburant. Elles sont monétarisées en fonction de la valeur tutélaire de la tonne de carbone ;
- des gains de sécurité : à partir des statistiques de sécurité routière, on établit des ratios d'insécurité routière par type d'infrastructure. La variation de la répartition du trafic sur le réseau permet de calculer les gains de sécurité que l'on peut escompter grâce à la nouvelle infrastructure qui sont ensuite monétarisés en fonction de la valeur tutélaire de la vie humaine ;
- des variations d'impôts et taxes : TVA sur le péage, l'entretien du véhicule et le carburant ; TIPP ; redevance domaniale, taxe professionnelle, taxe d'aménagement du territoire et impôt sur les sociétés payés par la société concessionnaire.

Avantages pour les riverains

L'unique avantage monétarisé retiré par les riverains concerne la pollution de l'air. Elle correspond à la variation d'émissions de particules fines entre la situation de référence et la situation de projet. Elle est valorisée à travers l'estimation des effets sanitaires associée à la valeur de la vie humaine utilisée pour la sécurité routière. Le calcul s'effectue à partir des variations de veh.km et du milieu traversé (urbain dense, urbain diffus, rase campagne).

Les nuisances sonores sont aussi prises en compte dans les études préalables (empreinte sonore, cartes de bruit), mais il ne s'agit pas d'un avantage monétarisé et intégré au bilan socio-économique pour des raisons de difficultés de mise en œuvre.

Les indicateurs agrégés du calcul socio-économique

Le calcul socio-économique fournit également une série d'indicateurs agrégés qui permettent de comparer projets et variantes sur des bases homogènes. Ces indicateurs sont souvent accusés par le public d'être des boîtes noires. Il est vrai que l'agrégation des résultats n'est pas intuitive, mais il faut rappeler qu'elle est la même pour tous les projets, ce qui garantit une analyse objective des effets. En outre, il est aisé de contourner cette critique par une présentation décomposée des avantages et des coûts constitutifs des indicateurs.

Le **bénéfice actualisé** est la somme des coûts et des avantages du projet sur toute sa durée de vie. Le projet est rentable pour la collectivité si le bénéfice actualisé est positif. Sans contrainte budgétaire, on classe les projets par bénéfice actualisé croissant.

La **date optimale de mise en service** est la date pour laquelle **le bénéfice actualisé à l'année 2004 est maximal.**

Le **Taux de Rentabilité Interne** (TRI) est le taux d'actualisation qui annule le bénéfice actualisé ; il représente l'efficacité du projet en termes de retour sur l'investissement et non en termes de gains totaux. Lorsqu'il est supérieur au taux d'actualisation, le projet est opportun pour la collectivité. Il sert à classer des variantes d'un même projet.

Le **bénéfice par euro investi** permet d'apprécier la rentabilité du projet dans un contexte de contrainte financière. Les projets sont alors classés par bénéfice par euro investi croissant.

Le **bénéfice actualisé par euro public investi** permet d'estimer la rentabilité du projet dans un contexte de rareté des fonds publics. Les projets sont alors classés par bénéfice par euro public investi croissant.

Pour comparer des scénarios d'aménagement, on retient une fois ceux-ci placés à leur date optimale et actualisés en 2004, celui qui a le plus grand bénéfice actualisé en l'absence de contrainte de financement, et celui qui a le plus grand bénéfice actualisé par euro public dépensé en présence d'une telle contrainte.

C'est l'étude de ces indicateurs qui permettra de juger de l'intérêt socio-économique du projet : il ne faut pas oublier cependant que tous les impacts ne sont pas forcément monétarisables. Comment monétariser en effet les avantages d'un projet d'exploitation routière qui ne fait pas baisser le temps de parcours moyen mais en réduit la variabilité et permet à l'usager un meilleur confort et une éventuelle réduction de son temps de précaution ? On peut également citer les effets du projet sur la biodiversité, la fragmentation des espaces, ou encore le risque de périurbanisation. Il est par ailleurs possible de faire appel à des techniques d'analyses multicritères, mais cela sort du cadre de cette étude.

Finalement, on rappelle que l'évolution de ces méthodes d'évaluation socio-économiques dépendent exclusivement des préconisations des instructions successives. Le choix du logiciel n'influe pas sur ces méthodes. On notera tout de même que le passage d'Ariane à TransCAD a conduit à développer des outils de calcul socio-économique plus largement paramétrables dans TransCAD que dans Ariane.

Chapitre III
Des évolutions dans les principes d'affectation du trafic

L'objet de ce chapitre est de comparer deux lois de répartition entre itinéraires :

- la loi d'Abraham implémentée dans Ariane ;
- la loi d'arbitrage prix-temps implémentée dans les Modules Sétra de TransCAD.

La première section de ce chapitre donne les bases théoriques pour chacune des deux lois d'affectation. Elle étudie également le principe de sélection des itinéraires et l'algorithme de calcul de l'équilibre. On verra ensuite le paramétrage de la distribution des valeurs du temps.

Une fois posées ces bases élémentaires des mécanismes et du paramétrage de deux lois d'affectation, nous comparerons les résultats à partir d'un exemple le plus simple possible : un réseau composé de deux arcs. Nous étudierons l'impact des paramètres du réseau sur les résultats de la comparaison.

Après avoir traité le calcul de la répartition des trafics à la première itération de l'affectation, nous pourrons comparer les résultats obtenus à l'issue du processus d'équilibrage.

On étudiera ensuite la deuxième composante des modèles de trafic qui a fortement évoluée d'Ariane à TransCAD : les courbes temps-débit.

On pourra alors combiner les différentes composantes des modèles, et estimer les parts respectives dans les écarts de résultats entre ces différentes composantes.

Pour conclure ce chapitre, on reviendra sur l'importance de vérifier la convergence des modèles de trafic.

1 - Principes théoriques des deux lois d'affectation

1.1 - Loi logit logarithmique ou Loi d'Abraham

On peut présenter la loi d'affectation implémentée dans Ariane selon différents cadres théoriques mais qui conduisent à la même formulation, d'où les deux noms utilisés indifféremment pour la désigner.

1.1.1 - Formulation de la loi d'Abraham

Avec une analogie entre la répartition du trafic et un courant électrique, le point de départ a été initié aux Etats-Unis dans les années 50 puis importée et formalisée par Claude Abraham vers 1960 [5] (d'où la dénomination "loi d'Abraham").

Le principe de cette loi d'affectation est le suivant : le flux d'une relation origine-destination (OD) est partagé entre plusieurs chemins (à définir explicitement) au prorata d'une puissance négative du temps généralisé du chemin. La répartition d'un flux F entre deux chemins 1 et 2 de temps généralisés G_1 et G_2 vérifie la relation :

$$F_1 / F_2 = (G_1 / G_2)^{-\theta}$$

Cette règle correspond aux observations empiriques quant à la répartition du trafic entre itinéraires concurrents : des chemins de temps égal supportent des trafics équivalents, mais si les temps diffèrent alors un chemin plus court reçoit davantage de trafic qu'un chemin plus long.

Le paramètre positif θ détermine le rôle de la différence des temps généralisés dans la différence de répartition. S'il est très faible, la répartition dépend peu de l'écart des temps, mais s'il est très élevé alors le chemin le plus court reçoit la quasi-totalité du trafic.
Cette loi peut s'écrire également avec la méthode dite des potentiels, où tous les chemins empruntés par une OD vérifient : $F_1 (G_1)^{\theta} = \ldots = F_k (G_k)^{\theta}$ où, avec k chemins empruntés, on a : $\sum_{j=1}^{k} F_j = F_{OD}$

Cette formulation permet de généraliser la loi de répartition à plus de deux itinéraires en concurrence. On peut également l'écrire de la façon suivante : la proportion de trafic qui emprunte le chemin i d'une OD vaut

$$\frac{F_i}{F_{OD}} = \frac{(G_i)^{-\theta}}{\sum_{j=1}^{k} (G_j)^{-\theta}}$$

On note qu'avec cette loi, tout chemin sélectionné reçoit une part de trafic non nulle.

1.1.2 - Loi logit logarithmique - Lien avec la théorie d'utilité aléatoire de l'usager

Il est possible de rattacher la règle de répartition d'Ariane à la théorie de l'utilité aléatoire de l'usager utilisée dans les modèles de choix discret (comme par exemple le choix modal). On reprend ici la démonstration de F. Leurent [8], qui montre que la loi d'Abraham correspond à un modèle logit multinomial avec un logarithme dans la fonction d'utilité.

On suppose qu'un voyageur attache à chaque chemin k une utilité aléatoire U_k, variable aléatoire composée d'un terme déterministe V_k plus une "erreur aléatoire" ξ_k de moyenne nulle. Cette erreur prend en compte statistiquement ce que l'analyste ne sait pas expliquer de façon déterministe dans le comportement du voyageur :

$$U_k(\omega) = V_k + \xi_k(\omega), \quad \omega \text{ notant l'aléa.}$$

On ajoute l'hypothèse que l'utilité déterministe attachée par un demandeur au chemin k est égale à l'opposé du logarithme du coût généralisé G_k : $V_k = -\log(G_k)$

Dans le modèle logit multinomial, on suppose encore que les erreurs ξ_k sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, suivant une loi de Gumbel d'écart-type $\pi / \sqrt{6}\theta$, avec donc une fonction de répartition commune : $\Pr(\xi_k \leq x) = \exp(-\exp(-\theta x + \gamma))$.

Où $\gamma = 0.577...$ est la constante d'Euler et θ est le paramètre de la distribution.

Le voyageur potentiel cherche à maximiser l'utilité qu'il retire de son déplacement. La fréquence de choix du chemin i est égale à la probabilité P_i que l'utilité U_i soit maximale, soit :

$$P_i = \Pr(\{U_i(\omega) \geq U_k(\omega) \ \ \forall k\}) = \frac{\exp(\theta V_i)}{\sum_k \exp(\theta V_k)} = \frac{(G_i)^{-\theta}}{\sum_k (G_k)^{-\theta}}$$

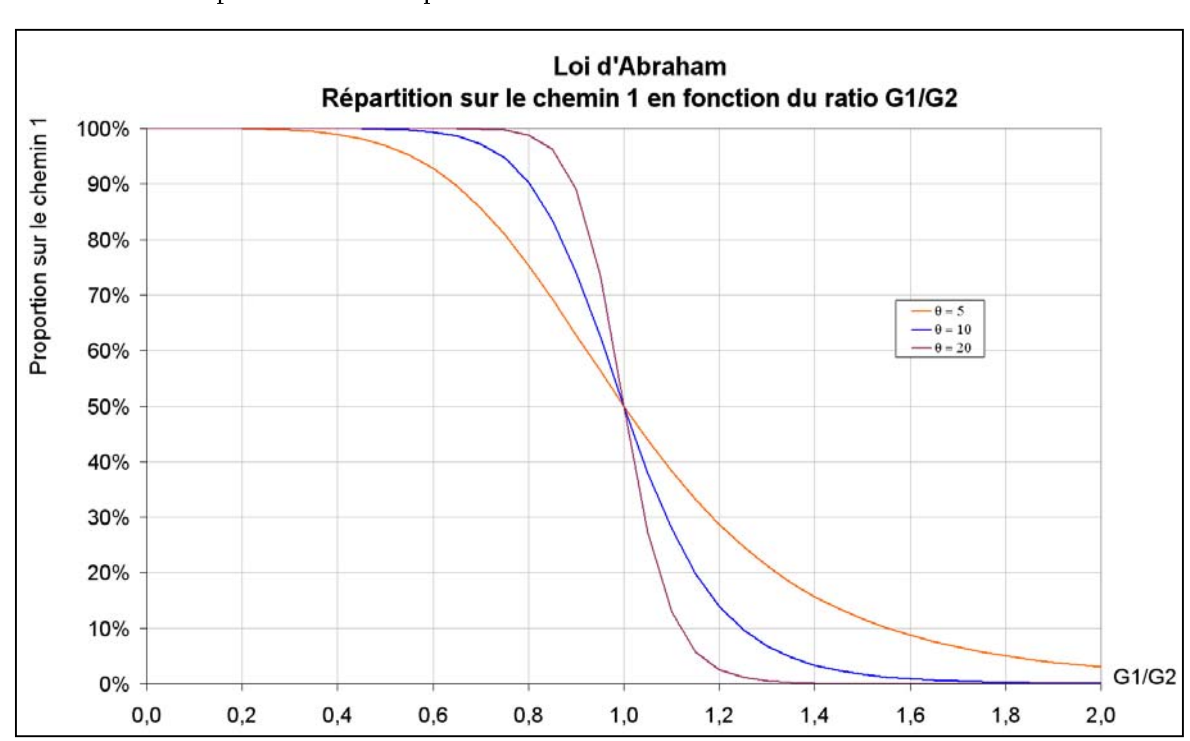
Pour deux itinéraires, on a donc: $P_1 / P_2 = F_1 / F_2 = (G_1 / G_2)^{-\theta}$.

On retrouve ainsi exactement la même formulation que la loi d'Abraham, d'où son autre nom de loi logit logarithmique.

1.1.3 - Interprétations du paramètre de dispersion

Le paramètre θ quantifie la précision de la perception du temps de parcours par le voyageur : plus θ est grand, plus la perception est précise, et plus le terme déterministe $\log(G_k)$ domine la partie aléatoire ξ_k dans la fonction d'utilité U_k. On peut également interpréter θ comme la précision de la connaissance de l'analyste sur le voyageur, ou encore comme la quantité d'informations mises à la disposition des conducteurs par un système de guidage.

Voici la fonction de répartition obtenue pour différente valeur de θ :



Dans Ariane, la valeur utilisée est θ=10 (non paramétrable). Mais notons que ce n'est pas le seul paramètre comportemental à fixer : il faut aussi spécifier les paramètres du coût généralisé, en particulier la valeur du temps moyenne, et le malus lié au confort et à la sécurité.

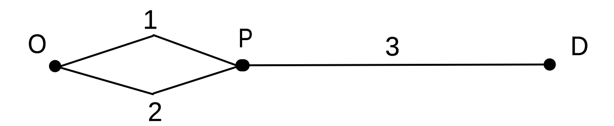
En ce qui concerne les valeurs du temps dans Ariane, elle est fixée à 74 FRF_{94} /h pour les VL et 194 FRF_{94} /h pour les PL, soit respectivement 14 $€_{2000}$/h et 32 $€_{2000}$/h. Ces deux valeurs ne peuvent pas être modifiées par l'utilisateur.

En ce qui concerne les malus d'inconfort, ils varient de 0 sur les autoroutes à 0.31 FRF_{94}/km soit 0.06 $€_{2000}$/km sur les routes bidirectionnelles.

Après avoir estimé les paramètres de confort et de valeur du temps à partir de données observées, il avait été difficile de recommander une valeur de θ adaptée à tous les types de concurrence. La valeur θ = 10 finalement retenue correspond mieux à la concurrence Route/Autoroute, qu'à la concurrence Route/Route.

1.1.4 - Limites

La loi logit logarithmique part de l'hypothèse que tous les chemins empruntés sont indépendants les uns des autres. Pour un réseau de transport, cela signifie qu'il ne devrait pas y avoir de chemins concurrents qui empruntent les mêmes arcs. Considérons l'exemple de réseau suivant, entre une Origine et une Destination, avec 3 arcs :

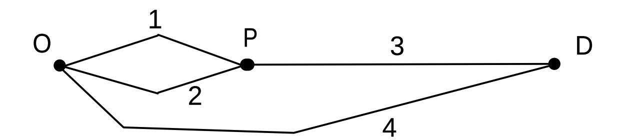


La répartition entre les chemins 13 et 23 est égale à : $F_{13}/F_{23} = \left[(G_1 + G_3)/(G_2 + G_3)\right]^{-\theta}$

La répartition entre les arcs 1 et 2 dépend ainsi du coût généralisé sur l'arc 3. On remarque qu'elle est égale à 50%, indépendamment des coûts sur 1 et 2, si le coût sur l'arc 3 est très élevé devant ceux de 1 et 2.

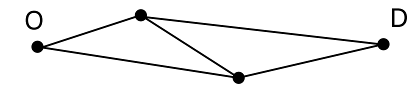
Afin de pallier ce problème, il est possible dans Ariane de définir un élément OP (entre les points de choix O et P), à partir duquel la répartition est calculée. On a alors : $F_1/F_2 = [G_1/G_2]^{-\theta}$

Le coût moyen est ensuite calculé pour l'élément OP, ce qui permet de mieux représenter les comportements lorsqu'il y existe une concurrence avec d'autres itinéraires comme dans le cas suivant :



La définition de l'élément OP permet d'éviter que la proportion de trafic sur l'arc 4 ne soit dépendante de chaque alternative possible entre O et P.

Cependant, la définition des éléments n'est pas toujours possible lorsque les chemins possibles sont imbriqués, comme dans l'exemple simple ci-dessous.



Dans ce cas, il est nécessaire de définir tous les itinéraires séparément, en restant en pratique dans une limite de trois itinéraires.

En effet, une autre limite apparaît lorsqu'on travaille avec plus de deux itinéraires. Lorsqu'on ajoute ou modifie une alternative, les flux sur tous les autres itinéraires sont modifiés. Il est ainsi en pratique très difficile de caler le modèle à partir de répartitions observées entre plusieurs itinéraires lorsque leur nombre est important. Des difficultés ont été notées pour des cas avec seulement 3 itinéraires en concurrence.

1.2 - Loi d'arbitrage Prix-Temps

Par analogie avec les modèles économiques, le modèle prix - temps différencie les demandeurs de déplacement, ie les usagers, au moyen d’un attribut de valeur du temps qui est distribué statistiquement parmi la population.

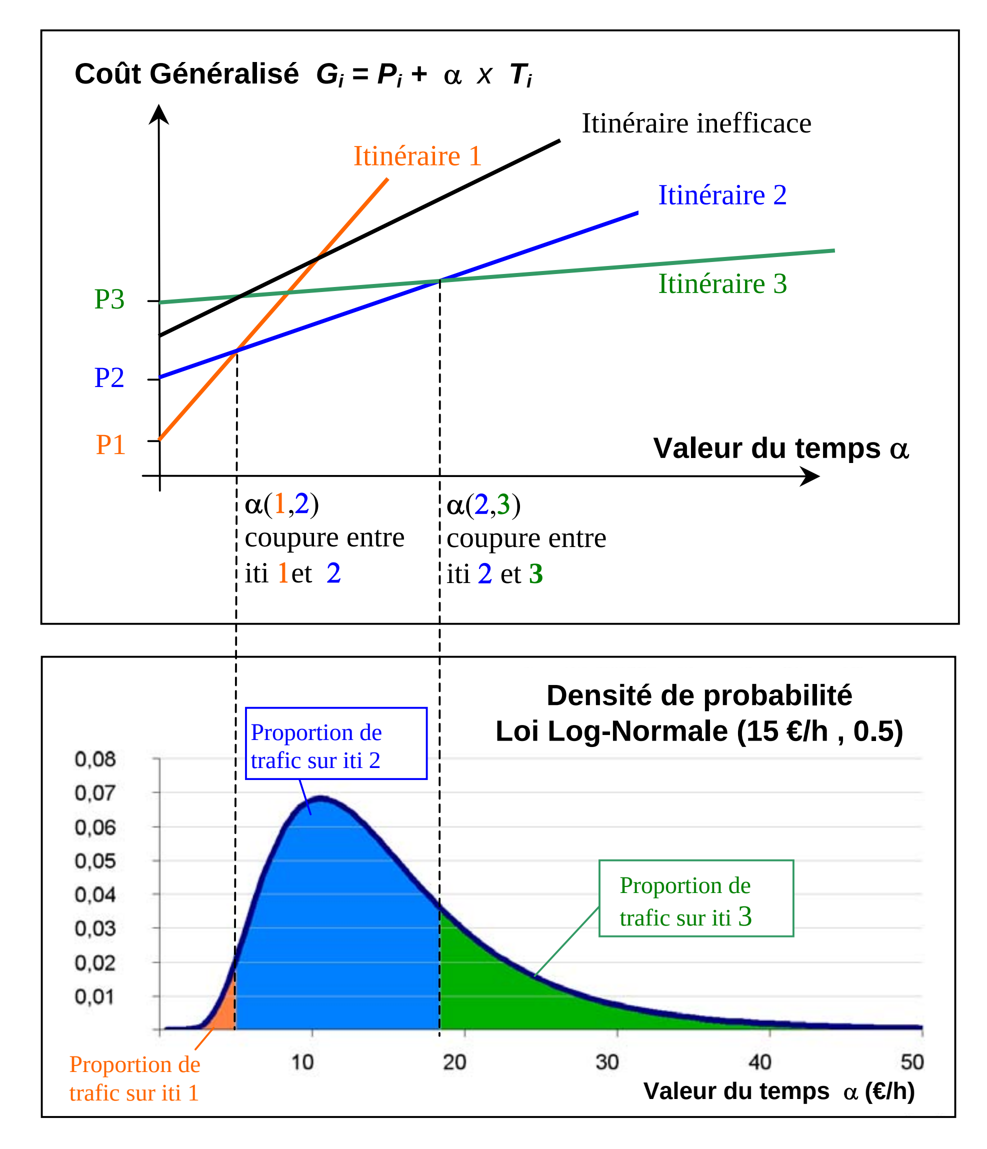
Les demandeurs à forte valeur du temps préfèrent les itinéraires rapides même s’ils sont chers, tandis que les demandeurs à faible valeur du temps choisissent les itinéraires moins chers, même s’ils sont plus lents. Le prix - temps élimine les itinéraires inefficaces : il exclut ainsi tout chemin tel qu’il en existe un autre à la fois plus rapide et moins cher.

On fait l'hypothèse que la valeur du temps des usagers est répartie de façon continue au sein de la population, selon une distribution log-normale. Cette loi est couramment utilisée pour représenter la distribution d'une valeur positive au sein d'une population comme la valeur du temps (et aussi par exemple les revenus des ménages). Cette distribution est définie à l'aide de deux paramètres, sa moyenne et son écart-type, qui sont analysés au 02 - Paramétrage des valeurs du temps.

La règle de choix d'itinéraire par l'usager exprime simplement sa rationalité économique individuelle : chaque usager choisit l'itinéraire qui minimise son coût généralisé : G = P + α T où

- P est le prix, c'est-à-dire les coûts de circulation, de péage…,
- T est le temps de parcours sur l'itinéraire,
- α est la valeur du temps des usagers.

La règle s'illustre sur un diagramme des coûts généralisés des itinéraires en fonction de la valeur du temps des usagers pour une O-D :



Sur le premier graphe, l'enveloppe inférieure des coûts généralisés représente le coût généralisé minimum offert par les différents itinéraires de la relation O-D à chaque valeur du temps. Pour chaque valeur du temps, elle donne l'itinéraire (ou chemin) choisi.

On peut déterminer graphiquement la valeur du temps de coupure α* entre les itinéraires 1 et 2, donnée par l'intersection des deux droites correspondant aux deux itinéraires :

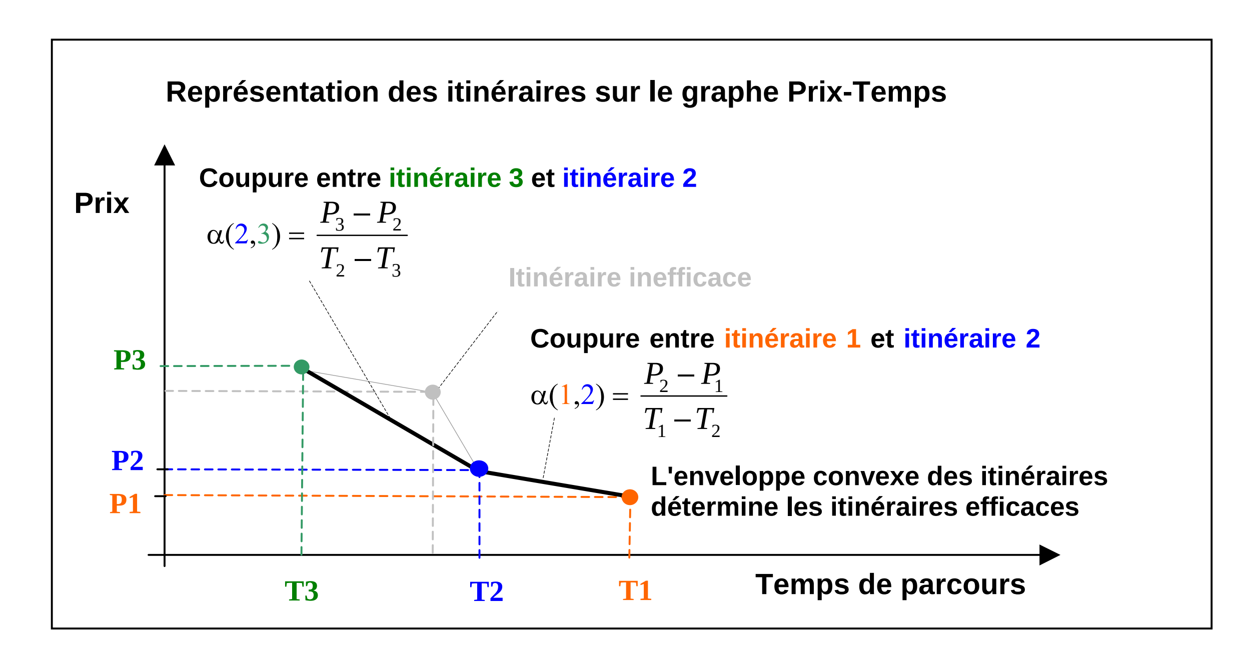
- itinéraire 1 de temps T_1 élevé et prix P_1 bas, droite d'équation : G = $P_1 + \alpha^* T_1$;
- itinéraire 2 de temps T_2 bas et prix P_2 élevé, droite d'équation : G = $P_2 + \alpha^* T_2$.

La résolution donne : $\alpha^* = \dfrac{P_2 - P_1}{T_1 - T_2}$

L'itinéraire 1 est choisi par les usagers dont la valeur du temps est inférieure à la valeur du temps de coupure α* (parfois aussi appelée valeur du temps critique). Ainsi, la proportion d'usagers affectés au chemin 1 est égale à la probabilité de choisir le chemin 1. Elle est égale à la probabilité que l'usager ait sa valeur du temps inférieure à α* que l'on peut déterminer à l'aide de la fonction de répartition cumulée (voir des exemples de courbes au § 02 - Paramétrage des valeurs du temps).

Le graphe des coûts généralisés ne permet pas en général d'avoir une bonne vision des itinéraires en concurrence. En effet, les coûts et les temps des itinéraires en concurrence étant relativement proches, les droites sont quasiment toutes parallèles entre elles et il est difficile de visualiser leur point d'intersection.

Une autre façon plus simple et utile de visualiser les itinéraires en concurrence consiste à les représenter dans un graphe Prix-Temps. Dans le diagramme suivant, chaque itinéraire est représenté par un point (T_i , P_i).



Sur ce graphe, la pente de la droite passant par deux points représentatifs de deux itinéraires est égale à :

Pente entre itinéraire **1** et **2** : $\frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1} = -\alpha^*$

Ainsi, on retrouve sur ce graphe la valeur du temps de coupure pour chaque couple d'itinéraires définie par l'opposée de la pente de la droite les reliant.

On peut également déterminer l'ensemble des itinéraires efficaces : ce sont ceux qui se trouvent sur l'enveloppe convexe des itinéraires.

L'itinéraire en gris qui ne se trouve pas sur l'enveloppe convexe est inefficace bien qu'il soit plus rapide et plus cher que les itinéraires 1 et 2, et moins rapide et moins cher que l'itinéraire 3. En effet, pour qu'un itinéraire soit efficace, il faut qu'il ait une de ces valeurs du temps de coupure avec un autre itinéraire dans une plage où cet autre itinéraire est efficace, sachant déjà que les itinéraires aux extrémités sont efficaces : le plus rapide et le moins cher.

En se déplaçant le long de la frontière efficace, les valeurs du temps de coupure entre les itinéraires efficaces sont strictement croissantes en partant de l'itinéraire le moins cher, strictement décroissantes en partant de l'itinéraire le plus rapide.

Dans les modules Sétra de TransCAD, la recherche des chemins efficaces est initiée par le chemin le moins cher, puis l'enveloppe efficace est déterminée à l'aide d'un algorithme de triangulation de Delaunay. Une fois les valeurs du temps critiques déterminées, les proportions sur chaque itinéraire sont calculées à l'aide d'un polynôme de degré 8 approchant (à 10^{-8} près) la répartition cumulée des valeurs du temps. Les flux de trafics sur chaque chemin sont ensuite obtenus en multipliant ces proportions par le nombre total de véhicules pour la relation OD traitée.

2 - Paramétrage des valeurs du temps

Avec la loi d'Abraham dans Ariane, la valeur du temps est un paramètre fixé pour tous les VL, et tous les PL. La loi d'affectation ne peut pas être paramétrée.

Avec l'affectation prix-temps, la valeur du temps des usagers est répartie de façon continue. La loi log-normale est couramment utilisée pour représenter la distribution d'une valeur positive au sein d'une population comme la valeur du temps (et aussi par exemple les revenus des ménages). Cette distribution est définie à l'aide de deux paramètres : sa moyenne et son écart-type.

Dans les modules Sétra, on définit a minima une distribution des valeurs du temps par classe de trafic (VL et PL). On peut spécifier des répartitions différentes par classe d'OD, sans limite du nombre de classes. Il est ainsi possible de définir une répartition log-normale par OD et par classe de véhicule, via sa moyenne et son écart-type.

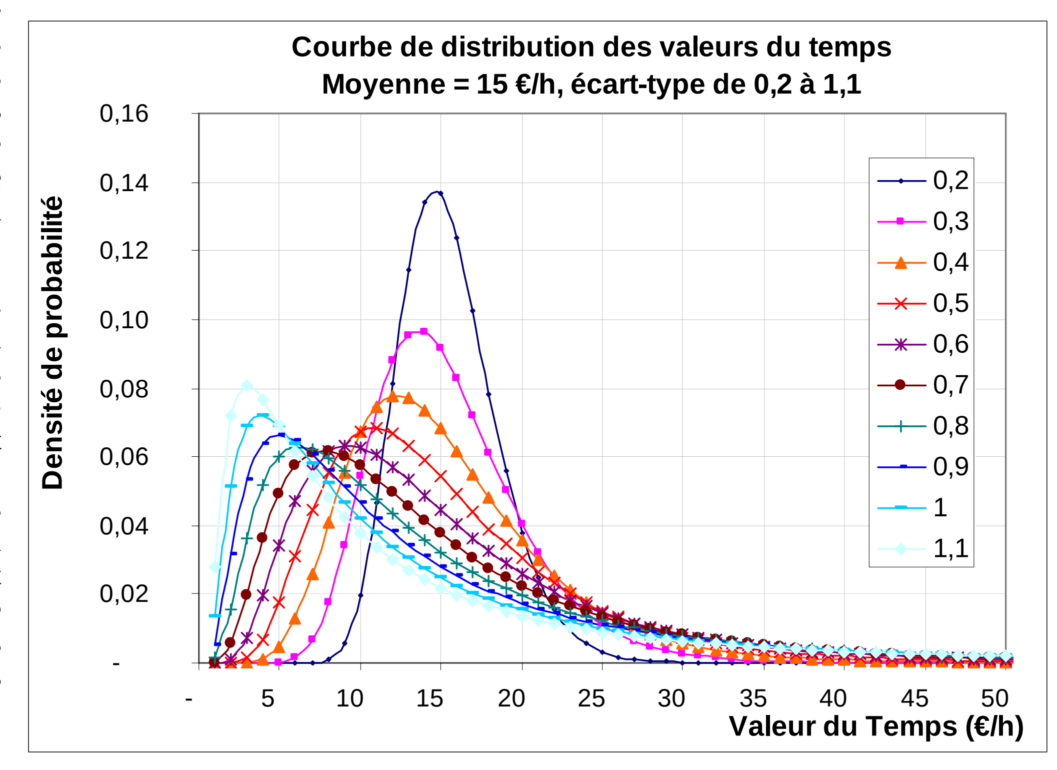
Étudions maintenant les deux paramètres de la distribution : moyenne et écart-type.

2.1 - Écart-type de la distribution log-normale

Lorsque l'on diminue l'écart-type de la distribution, celle-ci est plus concentrée autour de sa moyenne. Et le maximum de la courbe se rapproche de la moyenne.

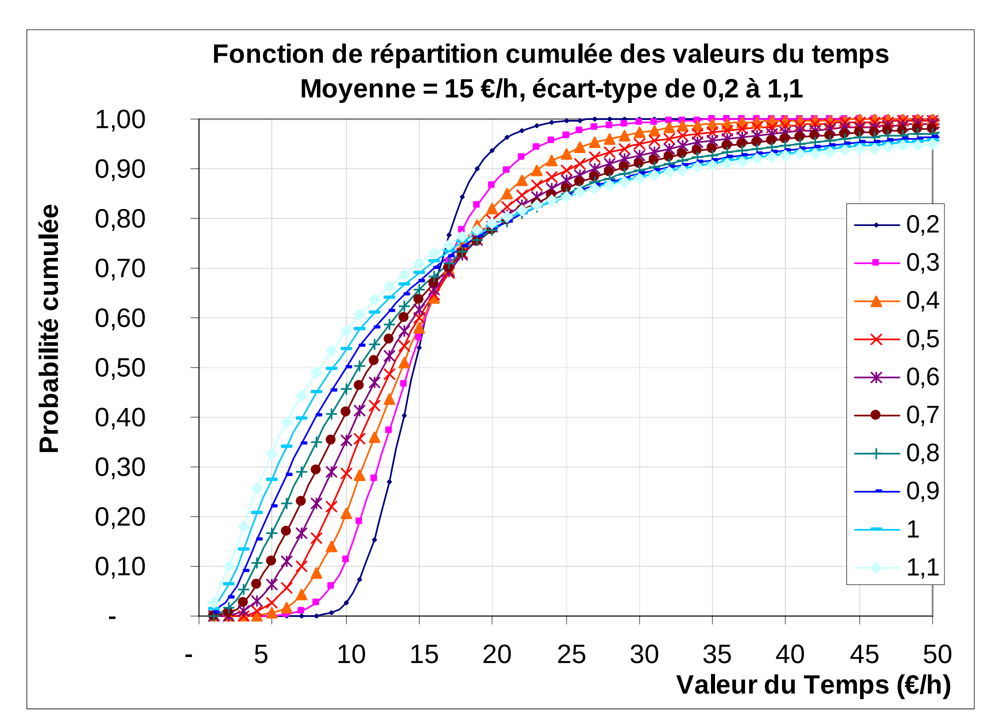
Par ailleurs, plus l'écart-type est élevé, plus les proportions des usagers aux valeurs du temps extrêmes sont élevées. Le pic de la distribution se rapproche de zéro quand l'écart-type croît.

On notera que les usagers aux très faibles valeurs du temps peuvent poser des problèmes s'ils sont trop nombreux, car ils évitent à tout prix les péages, quitte à emprunter des itinéraires très longs en temps. Cela est néanmoins souhaitable pour représenter des phénomènes observés d'évitement de péages.



Les courbes de répartition cumulée ci-contre permettent d'observer comment diminue la valeur médiane (à 50 %) lorsque l'écart-type augmente.

On note également que plus l'écart-type est petit, plus la répartition sera sensible autour de la valeur du temps médiane, mais moins elle le sera aux autres valeurs. Quand l'écart-type est élevé, la répartition est plus sensible aux faibles valeurs du temps.

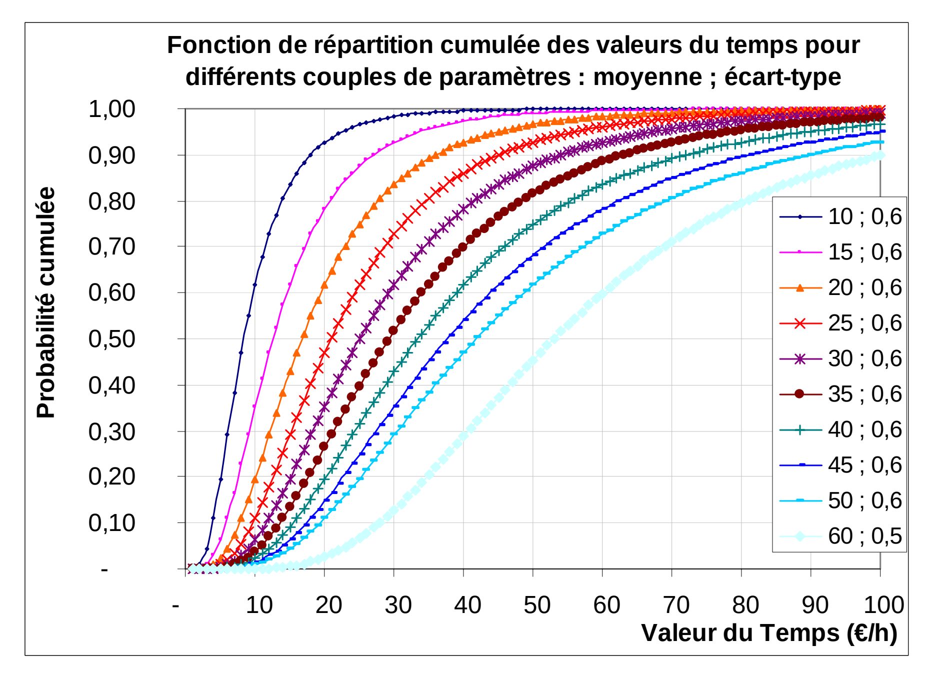


2.2 - Moyenne de la distribution log-normale

Les courbes ci-contre permettent d'appréhender les effets des variations de la moyenne des valeurs du temps sur la distribution. Quand la moyenne augmente, le pic de la distribution se déplace vers les valeurs du temps plus élevées, et on remarque également que la distribution s'aplatit.

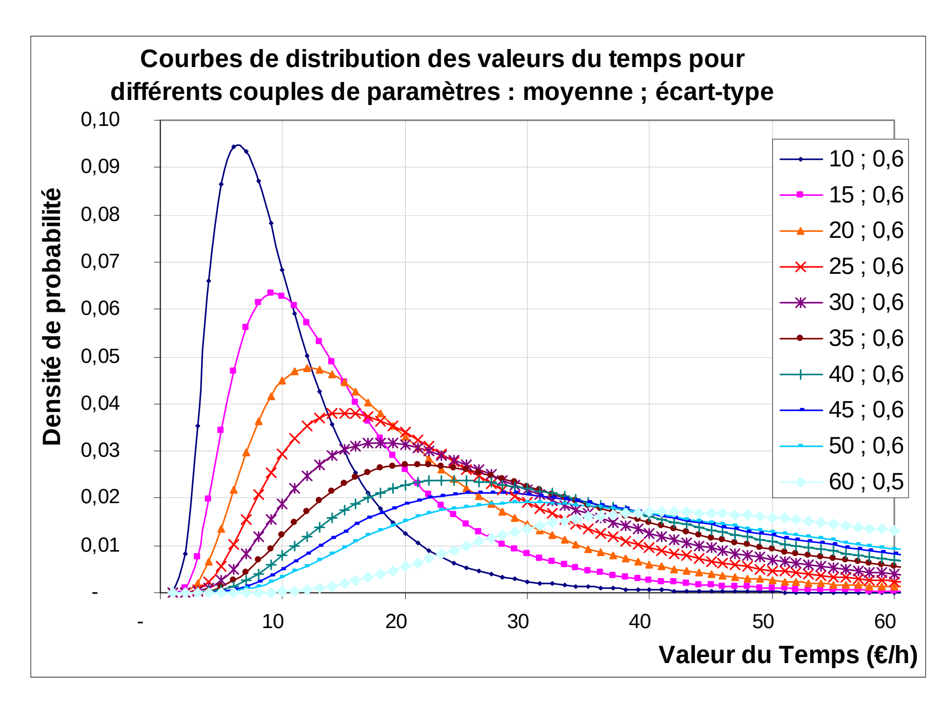
Lorsque l'on augmente la moyenne des valeurs du temps, on augmente bien évidemment la médiane, mais de façon moindre : le décalage entre la moyenne et la médiane augmente.

Si l'on veut déplacer la distribution vers la gauche sans l'aplatir (approximativement une translation), il est nécessaire à la fois d'augmenter sa moyenne et de réduire en même temps son écart-type.



A partir de ces courbes, on comprend qu'il y a une infinité de couples possibles des paramètres (moyenne ; écart-type) qui permet d'obtenir une répartition de trafic fixée entre deux itinéraires pour une valeur du temps de coupure donnée. Le calibrage de la distribution des valeurs du temps doit se faire sur un grand nombre d'OD, ce qui n'est pas toujours possible, d'autant plus que la valeur du temps dépend d'un grand nombre de variables.

Bien que les recommandations sur le paramétrage des valeurs du temps ne soient pas l'objet de ce rapport (le groupe de travail sur le calage des modèles de trafic doit apporter des éléments sur ce sujet), on peut déjà dire que les distributions retenues doivent être cohérentes avec ce que l'on sait des usagers. Notamment, les valeurs du temps augmentent avec la distance, et elles dépendent aussi des motifs des déplacements, ce dont il est possible de tenir compte dans la spécification de distributions par OD. Enfin, leurs paramètres doivent rester dans des intervalles raisonnables, et toute modification de la moyenne doit s'accompagner d'une réflexion sur l'écart-type.



3 - Sélection manuelle ou recherche automatique des itinéraires

Dans Ariane, les itinéraires en concurrence sont définis manuellement. Pour chaque OD, on indique le ou les chemins empruntés et le logiciel ne vérifie que la continuité des arêtes dans la description de l'itinéraire. Il faut noter que la sélection des itinéraires en concurrence est valable pour toutes les itérations de l'affectation, quelle que soit la charge sur le réseau. Le modélisateur doit donc anticiper le possible intérêt d'un itinéraire qui n'apparaît que lorsque tous les itinéraires concurrents sont chargés. Ce travail dépend de l'aménagement étudié, il est donc à refaire en cas de modification importante de celui-ci (par exemple l'ajout d'un échangeur).

Le codage manuel des itinéraires demande un travail important d'analyse du réseau et de saisie informatique, ainsi les modélisateurs ont fait savoir leur besoin d'un outil de recherche des plus courts chemins entre deux points, voire un outil de recherche automatique de tous les chemins. Cependant, il existe plusieurs critères possibles afin de choisir les itinéraires à mettre en concurrence, et aucun d'entre eux ni aucune de leur combinaison ne permet de répondre à ce besoin de façon pleinement satisfaisante, car le nombre de chemins doit rester faible avec la loi d'Abraham. La saisie manuelle des itinéraires avec Ariane est l'une des raisons de la forte simplification du réseau, ce qui limite le nombre d'itinéraires à codifier.

L'affectation Prix-Temps des modules Sétra intègre une procédure de recherche automatique des itinéraires. A chaque itération, l'ensemble du réseau est parcouru afin de déterminer les chemins dits efficaces. Un chemin est efficace s'il existe des usagers qui veulent emprunter ce chemin ; c'est-à-dire qu'il existe une valeur du temps pour laquelle ce chemin est celui de coût généralisé minimum. Sur cet itinéraire s'affectent tous les usagers qui ont une valeur du temps comprise entre les valeurs du temps de coupure de l'itinéraire. (*Voir les illustrations dans le paragraphe précédent).* Alors que les itinéraires sélectionnés sont figés dans Ariane, les itinéraires efficaces peuvent changer d'une itération à l'autre au cours de l'algorithme d'affectation prix-temps.

Ce processus automatique de sélection des chemins n'est pas limité en nombre de chemins. Il permet de modéliser des réseaux de très grande taille, sans avoir à les simplifier. Le fait d'avoir un réseau extrêmement détaillé peut en revanche poser des problèmes de convergence (cf. aussi § 07 - Analyse de la convergence) et avoir des conséquences inflationnistes sur le temps de travail à cause de la complexification des vérifications des itinéraires efficaces et de leur calage.

Vraisemblance des itinéraires

Les méthodes automatiques de recherches de chemins sélectionnent parfois des itinéraires peu vraisemblables.

Au-delà des erreurs de description du réseau, peuvent être sélectionnés des itinéraires peu probables, par exemple qui entrent et sortent de l'autoroute plusieurs fois au cours du déplacement. Dans la réalité, si les routes parallèles aux autoroutes sont localement plus intéressantes, seuls les usagers locaux sont en général susceptibles d'effectuer de tels mouvements. A contrario, si le logiciel trouve des itinéraires secondaires qui s'avèrent être plus intéressants que les routes principales, les véhicules peuvent s'y affecter dans une proportion importante bien qu'ils ne soient pas connus en réalité de tous les usagers. En effet dans les modèles, tous les usagers sont omniscients et ont pour seul objectif de réduire leur coût généralisé de déplacement. On rappelle également que les effets de la signalisation ne sont pas mesurés et les modèles de trafic ne savent pas les prendre en compte explicitement. Afin de limiter ces phénomènes qui vont souvent dans le sens de la surestimation des trafics sur les routes secondaires à défaut des autoroutes, le modélisateur doit ajuster les caractéristiques du réseau, et en particulier le malus d'inconfort sur les routes secondaires. Les valeurs des paramètres sont ajustées afin que les chemins sélectionnés et les répartitions des véhicules sur ceux-ci obtenues par le modèle soient les plus proches possibles des choix observés d'après les enquêtes. Afin d'éviter les multiples entrées et sorties des véhicules sur les autoroutes, une bonne solution consiste à créer les arcs reliant les différents types de routes entre eux (correspondant aux bretelles d'accès, mais de façon simplifiée) en ajoutant éventuellement de faibles pénalités

On rencontre une autre difficulté avec la recherche automatique des itinéraires lorsqu'il existe des usagers sur un itinéraire que le modèle ne trouve pas parce qu'il le considère comme inefficace. Pour une itération donnée, c'est le cas dès lors qu'un itinéraire est très légèrement plus cher et plus long en temps qu'un autre. En effet, le modèle fait l'hypothèse que les usagers sont rationnels, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité. Là encore, le modélisateur doit ajuster les caractéristiques des itinéraires en concurrence afin que les itinéraires efficaces et leur proportion (à l'issu du processus itératif de l'affectation) correspondent à la réalité.

D'autres cas à traiter apparaissent lorsque l'on introduit des interdictions de mouvements tournants : le modèle trouve parfois des itinéraires avec rebroussement de chemin. C'est-à-dire que les véhicules font demi-tour, en empruntant un arc dans un sens puis dans l'autre, de façon à arriver à une intersection où le mouvement souhaité n'est pas interdit. Le codage des interdictions de mouvements tournants et des arcs unidirectionnels nécessite ainsi des vérifications particulières sur les itinéraires retenus par le modèle.

Temps de travail et taille de l'aire d'étude

Contrairement à Ariane, la recherche automatique des itinéraires permet de ne pas avoir à définir manuellement les itinéraires. Cela évite une tâche pénible et longue en temps. Mais comme vu précédemment, le modélisateur doit s'assurer de la vraisemblance des itinéraires empruntés. Cependant, ces vérifications sont effectuées en même temps que le calage des répartitions des trafics entre itinéraires concurrents, travail qui était aussi nécessaire avec Ariane.

Au final, si les gains de temps pour réaliser une étude entre Ariane et TransCAD ne sont pas évidents à mettre en avant, c'est parce qu'avec les nouveaux modèles de trafic, la taille des aires d'études, et la finesse des réseaux et du zonage (le nombre de zones, de nœuds et d'arcs) ont fortement augmenté. Les modélisateurs passent en général moins de temps à l'analyse du réseau et à sa simplification. En revanche, le nombre d'itinéraires modélisés augmente ainsi que le temps passé aux vérifications des itinéraires empruntés.

4 - Études des paramètres du réseau à une itération donnée

L'objectif de cette section est de mieux appréhender les effets des variations de différents paramètres de la loi d'affectation, en comparant les deux principes d'affectation sur un réseau composé de deux arcs parallèles. On compare les deux lois de répartition entre ces deux arcs dont les caractéristiques sont fixées : le temps de parcours ne varie pas en fonction du niveau de trafic. Ces exemples permettent de comprendre les mécanismes d'affectation au niveau le plus simple, sans équilibre, correspondant aux résultats d'affectation obtenus pour une seule itération. Par extension, on trouverait ces résultats à l'équilibre pour des réseaux très peu chargés où les temps de parcours ne varient pratiquement pas en fonction de la demande.

Pour les deux lois d'affectation comparées, les deux paramètres que l'on peut faire varier indépendamment sont le temps de parcours et le coût. On peut également faire varier la longueur qui joue à la fois sur le coût et le temps. En effet, on rappelle que le coût généralisé utilisé dans les deux lois est donné par :

$$G = P + \alpha T = L \ (C + \alpha / V)$$

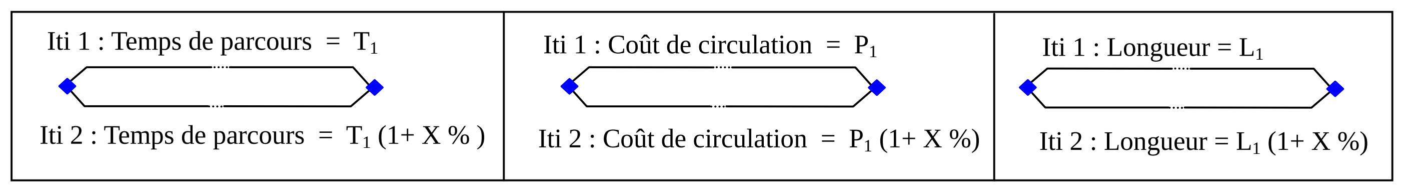
où P est le prix total, T le temps de parcours total, C le coût kilométrique, V la vitesse.

L'objectif de cette section est de connaître les effets des variations des paramètres du réseau (temps, coûts, longueur) sur les résultats d'affectation avec chacune des deux lois.

Dans cette section, les paramètres des valeurs du temps sont fixés (leurs variations ont été analysées au § 2). On ne prend pas encore en compte les effets de la demande sur les temps de parcours, ceux-ci étant l'objet du § 5. On analyse pour l'instant l'affectation pour une itération donnée, sur des cas de concurrence très simples, avec une complexité croissante. On traitera dans un premier temps le cas de la concurrence entre deux routes de même type en ne faisant varier qu'un seul paramètre. Dans un deuxième temps, on étudie la concurrence entre deux routes de types différents après avoir cherché les conditions d'égalité de la répartition de trafic avec les deux lois d'affectation.

4.1 - Cas de deux itinéraires de même type – Variation d’un seul paramètre

Étudions différents cas de deux itinéraires concurrents identiques à un seul paramètre près.



On remarquera que faire varier la longueur de x % revient à faire varier dans la même proportion à la fois le temps de parcours et le coût de circulation.

4.1.1 - Répartitions du trafic avec la loi d'Abraham

Avec la loi d’Abraham, on obtient les répartitions suivantes :

$\frac{F_1}{F_2} = \left(1 + X \frac{\alpha \times T_1}{P_1 + \alpha \times T_1}\right)^{10}$	$\frac{F_1}{F_2} = \left(1 + X \frac{P_1}{P_1 + \alpha \times T_1}\right)^{10}$	$\frac{F_1}{F_2} = (1 + X)^{10}$

Applications numériques

Pour la différence entre les 2 itinéraires, on prend X = 5 %, ce qui pourrait être l'ordre de grandeur de la limite de perception des usagers. Pour la valeur du temps, on retient par défaut : α = 15 € /h.

On compare deux types de concurrences pour des situations et des valeurs numériques extrêmes de façon à obtenir des résultats donnant un intervalle dans lequel tous les autres types de routes seront inclus.

1er cas : concurrence de routes de type autoroutier

On considère les caractéristiques suivantes : T1 = L1 / 130 km/h ; P1 = L1* 0,267 € / km

Dans le coût généralisé, le poids des facteurs temps et coût sont respectivement de 30% et 70%.

Résultats avec la loi d'Abraham :

T2 / T1 = 1,05	P2 / P1 = 1,05	L2 / L1 = 1,05
F1 / F2 = 1,16	F1 / F2 = 1,41	F1 / F2 = 1,63
Iti 1 : 54 % Iti 2 : 46 %	Iti 1 : 58 % Iti 2 : 42 %	Iti 1 : 72 % Iti 2 : 38 %

2e cas : concurrence de routes de type urbain

T1 = L1 / 30 km/h ; P1 = L1 * 0,167 € / km

Dans le coût généralisé, le poids des facteurs temps et coût sont respectivement de 75% et 25%.

Résultats avec la loi d'Abraham :

T2 / T1 = 1,05	P2 / P1 = 1,05	L2 / L1 = 1,05
F1 / F2 = 1,44	F1 / F2 = 1,13	F1 / F2 = 1,63
Iti 1 : 59 % Iti 2 : 41 %	Iti 1 : 53 % Iti 2 : 47 %	Iti 1 : 72 % Iti 2 : 38 %

On observe ici que les résultats sont variables en fonction du paramètre modifié et du type de route utilisé. La répartition entre les deux routes reste cependant assez équilibrée, avec une proportion de trafic maximum de 72 % sur l'itinéraire le plus intéressant.

4.1.2 - Répartitions avec la loi prix-temps

Quel que soit le type de route retenu, et donc notamment pour les deux applications avec un type urbain et un type autoroutier ci-dessus, l'application de la loi prix-temps donne une proportion de trafic de 100 % sur l'itinéraire 1 :

T2 / T1 = 1,05	P2 / P1 = 1,05	L2 / L1 = 1,05
F2 / F1 = 0	F2 / F1 = 0	F2 / F1 = 0
Iti 1 : 100 % Iti 2 : 0 %	Iti 1 : 100 % Iti 2 : 0 %	Iti 1 : 100 % Iti 2 : 0 %

Lorsque deux itinéraires sont identiques vis-à-vis de leur type, l'augmentation de l'un des paramètres fait "basculer" tout le trafic sur un seul des itinéraires. Cet effet est ressenti par les modélisateurs comme une instabilité de l'affectation prix-temps. Cependant, il est en partie compensé par l'équilibrage de la répartition grâce à la variation des temps de parcours via les courbes temps-débit. Il reste cependant que cette "radicalité" du modèle prix-temps peut poser des difficultés de convergence (voir § 07 - Analyse de la convergence).

Si on a deux itinéraires qui offrent les mêmes caractéristiques avec des coûts et des temps très proches, on obtient des résultats très différents avec les deux principes de répartition : proche de 50-50 avec la loi d'Abraham, alors que la loi prix-temps met tout le trafic sur le plus efficace. On sera particulièrement attentif en milieu urbain car le maillage du réseau offre des itinéraires très similaires (par exemple deux rues parallèles dans une agglomération). Ce constat sera cependant nuancé avec l'introduction de la prise en compte de l'effet des débits sur les temps de parcours.

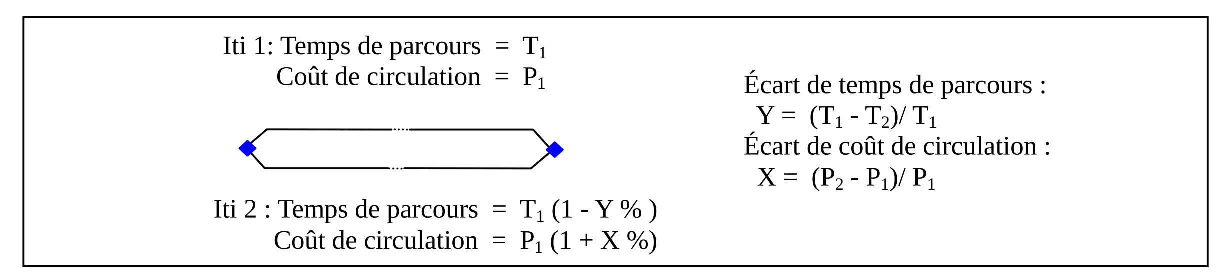
Quelle que soit la loi d'affectation utilisée, la longueur des itinéraires est un paramètre essentiel. On attire donc l'attention des modélisateurs sur l'importance d'estimer avec précision les longueurs des arcs, et particulièrement pour les sections en projet neuf.

4.2 - Cas de deux itinéraires différents – Variation des paramètres de coût et de temps

Dans l'analyse considérée ici, on combine une différence à la fois dans le coût de circulation et dans le temps de parcours, mais en les faisant varier dans des directions opposées, toujours pour une seule itération.

En effet, avec l'affectation prix-temps, la condition sine qua non pour que deux itinéraires soient concurrents, est que l'un des deux itinéraires soit plus cher et plus rapide. Cet itinéraire sera emprunté par les usagers qui ont une valeur du temps supérieure à celle de coupure, alors que l'autre, moins cher et moins rapide, sera emprunté par les usagers ayant une valeur du temps plus faible. On précise ici que cette condition est nécessaire, mais non suffisante dans le cas où plus de deux itinéraires sont possibles (voir par exemple l'itinéraire inefficace présenté sur le graphe de principe § 1.2).

On considère maintenant deux routes de types différents, la première rapide et chère, la seconde lente et bon marché.



On choisit l'itinéraire 2 de façon à ce qu'il corresponde à l'itinéraire le plus cher et rapide, X et Y sont ainsi toujours positifs.

4.2.1 - Condition d'égalité des deux lois d'affectation

Avec la loi d'Abraham, si les différences dans le coût (X) et le temps (Y) se compensent dans le coût généralisé avec la valeur du temps (avec par exemple α = 15 € /h) alors on obtient une répartition égale (50-50) entre les deux itinéraires. Cette condition est vérifiée si et seulement si :

$$\mathbf{G_1 = G_2 \quad \Leftrightarrow \quad X / Y = \alpha \; T_1 / P_1}$$

Avec l'affectation prix-temps, on obtient une répartition égale si et seulement si la valeur du temps de coupure est égale à la valeur du temps médiane de la répartition. Cette condition est vérifiée si et seulement si :

$$\alpha_{\text{coupure}} = \alpha_{\text{médiane}} \Leftrightarrow \mathbf{X / Y} = \alpha_{\text{médiane}} \mathbf{T_1 / P_1}$$

En rapprochant ces deux équations, on s'aperçoit qu'en travaillant avec une distribution des valeurs du temps **où la médiane est égale à la valeur du temps utilisée dans la loi d'Abraham**, si la répartition du trafic est 50-50 entre deux itinéraires pour une loi d'affectation, alors elle le sera également pour l'autre. De plus avec cette hypothèse, l'itinéraire qui sera le plus chargé avec une loi le sera également avec l'autre. Cela implique également que la différence entre les deux résultats en répartition ne pourra pas dépasser 50%.

On note que pour les distributions des valeurs du temps où la médiane est différente de la valeur du temps retenue pour la loi d'Abraham, on peut trouver des cas où l'itinéraire le plus intéressant change selon la loi d'affectation, et des différences en répartition supérieures à 50 %.

Voici plusieurs exemples de paramètres des valeurs du temps qui vérifient la propriété d'équivalence entre la loi d'Abraham et prix-temps pour une répartition 50-50 :

Moyenne de la distribution des valeurs du temps (€$_{2000}$/h)	Écart-type de la distribution des valeurs du temps	Médiane de la distribution (€$_{2000}$/h) = Valeur du temps pour la loi d'Abraham
16.61	0.7	13
14.73	0.5	13
15	0.5	13.24

Afin de pouvoir comparer les deux principes d'affectation, nous nous placerons toujours par la suite avec les hypothèses de valeur du temps en gras ci-dessus. Ces valeurs sont en cohérence avec celles préconisées par l'instruction sur l'évaluation des projets routiers de 2004.

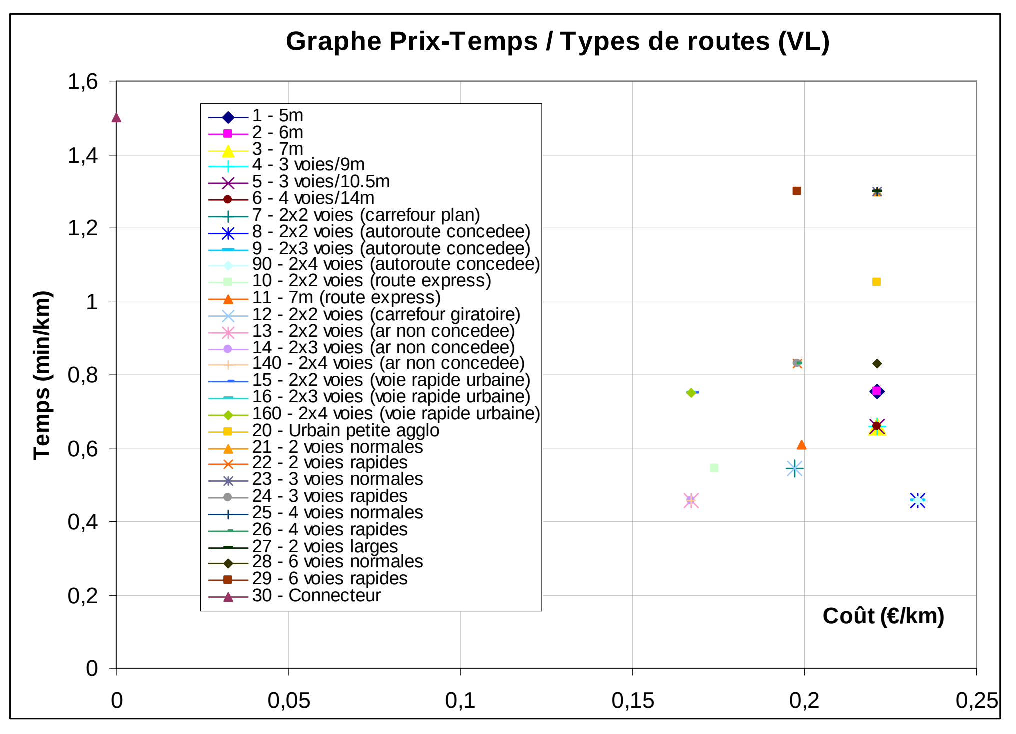
4.2.2 - Analyse des différences entre les deux lois

On considère dans cette section les types de routes habituellement utilisés pour la modélisation des trafics avec Ariane et TransCAD (cf II. 2.1 - Représentation de l'offre de transport).

Une première façon d'analyser leur niveau de concurrence, pour des temps de parcours à vide (on rappelle que dans cette section, on ne s'intéresse pas à l'effet de la charge sur le temps de parcours) et pour des longueurs identiques avec le paramétrage par défaut de la table Setra_vdf (Annexe 4), est de les représenter sur le graphe prix-temps.

Cette représentation des types de route sur le graphe prix-temps permet de visualiser la hiérarchie entre les coûts et les temps des différents types de routes (pour 1 km).

Les caractéristiques de temps et de coût d'une route sont égales à la longueur de la route fois son coût kilométrique et son temps kilométrique représentés ci-contre. Avec le paramètre de longueur de la route, on se déplace sur ce graphe prix-temps le long de la droite passant par le point origine (0,0).



On note qu'il n'est pas utile de comparer les types listés dans le tableau suivant car ils ont les mêmes paramètres (sauf la capacité, mais qui ne joue pas ici puisque l'on travaille à vide).

Type de route n°	Nom du type de route	Identique au type
2	2 voies / 6m	(1) – 2 voies / 6m
4	3 voies/9m	(3) – 7m
5	3 voies/10.5m	
6	4 voies/14m	
12	2x2 voies (carrefour giratoire)	(7) – 2x2 voies (carrefour plan)
9, 90	2x3 et 2x4 voies (autoroute concédée)	(8) – 2x2 voies (autoroute concédée)
14, 140	2x3 et 2x4 voies (autoroute non concédée)	(13) – 2x2 voies (autoroute non concédée)
16, 160	2x3 et 2x4 voies (voie rapide urbaine)	(15) – 2x2 voies rapides urbaines
23, 25, 28	Urbain - 3, 4 et 6 voies normales	(21) – 2 voies normales
27	2 voies larges	
24, 26, 29	Urbain - 3, 4 et 6 voies rapides	(22)– 2 voies rapides

Voici la liste des types que nous allons comparer, classés par ordre croissant de coût kilométrique :

Type de route n°	Nom du type de route	Temps à vide (min/km)	Vitesse à vide (km/h)	Coût kilométrique (€2000)
8	2x2 voies (autoroute concédée)	0,458	131	0,233
21	Urbain - 2 voies normales	1,300	46	0,221
3	7m	0,659	91	0,221
11	7m (route express)	0,608	99	0,199
22	2 voies rapides	0,830	72	0,198
7	2x2 voies (carrefour plan)	0,545	110	0,197
10	2x2 voies (route express)	0,545	110	0,174
15	2x2 voies (voie rapide urbaine)	0,750	80	0,167
13	2x2 voies (AR non concédée)	0,458	131	0,167

Afin de mesurer l'impact du paramétrage du type de route sur les lois d'affectation, on calcule dans le tableau ci-après la répartition pour chaque couple de types de routes en les supposant de même longueur (et toujours à vide pour l'instant).

On a également calculé pour chaque couple de types de routes, la condition en termes d'écart de longueur qui permet d'obtenir une répartition égale entre les deux itinéraires (et l'écart en temps et en coût qui en résulte).

Afin de déterminer cette longueur, on introduit un nouveau paramètre qui ne dépend pas de la longueur des routes. Parce que l'unité de ce nouveau paramètre est l'euro par heure (€/h), on choisit de le nommer *valeur du temps kilométrique*. Pour chaque type de route, il correspond sur le graphe prix-temps précédent à la pente entre l'origine (0,0) et le point correspondant au type de route. Il est définit comme suit :

Valeur du temps kilométrique route 1 : $VdT_1 = P_1/T_1 \iff VdT_1 = C_1 \text{ x } V_1$

En réutilisant cette notation dans ce qui précède, on obtient une répartition 50-50 si et seulement si : $\mathbf{X / Y = \alpha / VdT_1}$

D'après la définition de X et Y, on peut également écrire la valeur du temps de l'itinéraire 2 :

Valeur du temps kilométrique route 2 : $VdT_2 = C_2 \text{ x } V_2 \iff VdT_2 = \frac{1+X}{1-Y} \times VdT_1$

Les équations précédentes permettent de déterminer cet écart de longueur qui vérifie la répartition 50-50% :

$$\text{Écart Longueur (50-50)} = \frac{1}{(1-Y)} \frac{VdT_1 - VdT_2 - Y\left(VdT_2 + \alpha_{méd}\right)}{\alpha_{méd} + VdT_2}$$

Le tableau suivant donne les résultats de la comparaison pour la concurrence (à vide) entre les principaux types de routes deux à deux avec une longueur égale, et les écarts de longueur, temps et prix qui vérifient 50-50%.

Concurrence entre les couples d'itinéraires suivants				À longueur égale, % de trafic sur l'arc 2 (le plus cher et rapide dans le cas 50-50)		Conditions pour une répartition égale (50 -50 %) (Abraham et Prix-Temps)			
Type de l'arc 2	Type de l'arc 1	Écart de temps kilométrique à vide (T1-T2)/T1	Écart de coût kilométrique (C2-C1)/C1	Loi d'Abraham	Prix-Temps	Écart de longueur (L2 – L1)/L1	(T1-T2)/T1	(P2-P1)/P1	
8	21	65%	5%	98%	100%	51,3%	47%	60%	
8	15	39%	40%	48%	47%	-0,8%	39%	38%	
8	22	45%	18%	78%	95%	13,7%	37,2%	33,8%	
8	10	16%	34%	22%	1%	-12,1%	26%	18%	
8	11	25%	17%	49%	46%	-0,5%	25%	17%	
8	3	31%	5%	71%	100%	9,5%	24%	15%	
8	7	16%	18%	37%	10%	-5,2%	20%	12%	
8	13	0%	40%	10%	0%	-19,9%	20%	12%	
13	21	65%	-24%	100%	100%	88,8%	33%	43%	
13	15	39%	0%	89%	100%	23,8%	24%	24%	
13	22	45%	-16%	97%	100%	41,9%	22%	20%	
13	10	16%	-4%	72%	100%	9,7%	8%	5%	
13	11	25%	-16%	90%	100%	24,2%	6%	4%	
13	3	31%	-24%	96%	100%	36,6%	5%	3%	*
13	7	16%	-15%	84%	100%	18,3%	1%	0%	*
7	21	58%	-11%	99%	100%	59,5%	33%	42%	
7	15	27%	18%	61%	78%	4,6%	24%	23%	
7	22	34%	-1%	86%	100%	19,9%	21%	19%	
7	10	0%	13%	32%	0%	-7,3%	7%	5%	*
7	11	10%	-1%	62%	100%	5,0%	6%	4%	*
7	3	17%	-11%	81%	100%	15,5%	5%	3%	*
3	21	49%	0%	96%	100%	38,2%	30%	38%	
3	15	12%	32%	27%	2%	-9,4%	20%	20%	
3	22	21%	12%	59%	83%	3,9%	18%	16%	
3	10	-21%	27%	10%	0%	-19,7%	3%	2%	*
3	11	-8%	11%	28%	0%	-9,1%	1%	1%	*
11	21	53%	-10%	99%	100%	52,0%	29%	37%	
11	15	19%	19%	49%	47%	-0,4%	19%	19%	
11	22	27%	1%	79%	100%	14,2%	16%	15%	
11	10	-12%	14%	22%	0%	-11,7%	1%	1%	*
10	21	58%	-21%	100%	100%	72,1%	28%	35%	
10	15	27%	4%	77%	100%	12,8%	18%	18%	
10	22	34%	-12%	93%	100%	29,4%	15%	14%	
22	21	36%	-10%	95%	100%	33,0%	15%	19%	
22	15	-11%	19%	20%	0%	-12,8%	3%	3%	*
15	21	42%	-24%	99%	100%	52,6%	12%	15%	

Pour un certain nombre de cas, une faible variation des hypothèses donne une répartition à 100 % sur un itinéraire avec le prix-temps, alors que la loi d'Abraham donne 50-50 : l'un des itinéraires est inefficace, dès lors que les longueurs sont peu différentes de celles à répartition égale. Les cas les plus sensibles sont repérés avec le symbole *.

On trouve que les cas sensibles correspondent à ceux où la différence de coût entre les deux itinéraires est faible (< 10 %) et la sensibilité devient extrême pour des différences de coût de l'ordre de 1 %.

Ces cas témoignent de la forte sensibilité du prix-temps au coût et à la longueur. C'est particulièrement le cas des comparaisons entre deux itinéraires où l'un des deux possède à la fois le coût et le temps kilométrique le plus avantageux. C'est aussi le cas pour les types de routes qui ont des valeurs du temps kilométrique proches, comme les types 3, 10 et 11 (2 voies bidirectionnelles, 2 x 2 voies express, 2 x 1 voie) autour de 20 €/h.

On rappelle que le principe d'équilibrage atténue la sensibilité du prix-temps (voir § 5). Néanmoins, ce constat permet de mettre en garde les modélisateurs travaillant sur des zones non congestionnées.

De façon générale, on peut dire que la loi prix-temps est plus discriminante que la loi d'Abraham, qui tend à répartir le trafic de façon relativement égalitaire entre les itinéraires.

En revanche, étant donné qu'elle a plus de paramètres, la loi prix-temps permet de mieux reproduire une répartition observée localement, à condition de calibrer l'ensemble des paramètres de façon à reproduire ces observations.

5 - Prise en compte du niveau de demande : effets des paramètres à l'équilibre

5.1 - Principe de calcul de l'équilibre

Avec la prise en compte de l'effet de la charge du réseau sur les temps de parcours, la répartition du trafic résulte d'un équilibrage entre la demande et l'offre. On peut expliquer le principe d'équilibrage de la façon suivante : si l'on affecte plus de trafic sur un chemin, alors le temps de parcours sur celui-ci augmente, ce chemin devenant ainsi moins intéressant. Certains usagers ont donc intérêt à changer leur itinéraire, pour un autre, qui apparaît plus efficace car finalement moins encombré. L'équilibrage est la situation dans laquelle plus aucun usager n'a intérêt à modifier son itinéraire. Ceci est formalisé par le principe de Wardrop, qui stipule qu'il y a équilibre lorsque aucun usager n'a d'intérêt à modifier son itinéraire (et tout itinéraire emprunté est de coût généralisé minimum).

Concrètement, on peut vérifier qu'il y a un équilibre si un nouveau calcul de répartition du trafic sur le réseau ne modifie pas les temps de parcours sur les arcs du réseau par rapport à une situation précédente.

Pour calculer les temps de parcours, on utilise des courbes temps-débit (également appelée débit-vitesse) qui permettent pour un niveau de trafic donné par arc, de calculer le temps de parcours moyen pour les usagers. Les courbes utilisées en interurbain sont explicitées au paragraphe 6.

Si l'on peut calculer mathématiquement les répartitions à l'équilibre à l'aide d'équations dans les cas extrêmement simples, ce calcul est très rapidement insurmontable lorsque le nombre d'arcs et de nœuds augmente, ou dès lors que certains arcs sont empruntés par différents itinéraires.

Par exemple, dans le cas de 3 arcs entre 2 nœuds, le système d'équation à résoudre pour l'affectation prix-temps est le suivant :

$$\begin{cases} F_1 / F_{Tot} = f\left(\alpha_{1,2}\right) \text{ ; avec } \alpha_{1,2} = \dfrac{P_2 - P_1}{T(F_1) - T(F_2)} \\ F_2 / F_{Tot} = f\left(\alpha_{2,3}\right) - f\left(\alpha_{1,2}\right) \text{ ; avec } \alpha_{2,3} = \dfrac{P_3 - P_2}{T(F_3) - T(F_2)} \\ F_3 / F_{Tot} = 1 - f\left(\alpha_{2,3}\right) \end{cases}$$

où $f(\alpha)$ est la fonction de répartition cumulée de la loi log-normale.

Le système vérifie : $F_1 + F_2 + F_3 = F_{OD}$

Ce type de système d'équations est généralement résolu numériquement plutôt qu'analytiquement, c'est-à-dire qu'on utilise un algorithme d'optimisation sous contrainte comme par exemple le solveur d'un tableur.

Dans les outils logiciels de modélisation des trafics, la seule possibilité envisageable est de calculer l'équilibre également à l'aide d'un algorithme, qui peut être décrit à l'aide du processus itératif suivant (issu des modules Sétra) :

- initialisation : calcul des temps de parcours à vide sur tous les arcs et chargement initial (0 dans TransCAD et 1/k * flux total pour Ariane avec k, nombre d'itinéraires possibles entre O et D) ;

- étapes pour chaque itération, et pour chaque OD :
  - étape 1 : Recherche des chemins efficaces (= détermination des chemins empruntés). Pour chaque chemin, on calcule la somme sur les arcs empruntés des coûts et des temps de parcours déterminés précédemment ;
  - étape 2 : Calcul des **flux auxiliaires** issus de la répartition entre les différents chemins empruntés en fonction des coûts et temps calculés à l'étape précédente ;
  - étape 3 : Calcul des **flux résultats** à partir d'une combinaison entre la nouvelle répartition et la répartition issue de l'itération précédente (seule une partie du trafic est "réaffectée" selon les nouvelles proportions) ;
  - étape 4 : Calcul des temps de parcours pour chaque arc en fonction des trafics l'empruntant.

On itère les étapes 1 à 4 jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt du calcul soit atteint, par exemple un nombre maximum d'itérations prédéfini ou un seuil pour un critère de convergence (cf § 07 - Analyse de la convergence).

La 3e étape est nécessaire afin d'avoir un processus itératif qui converge. En effet, seule une partie du trafic est réaffectée selon les nouvelles proportions calculées à l'itération en cours et cette partie réaffectée diminue avec le nombre d'itérations de façon à ce que l'algorithme converge vers un équilibre. La méthode implémentée dans les modules Sétra de TransCAD et qui est couramment utilisée, est la méthode dite MSA pour Method of Successive Average (Méthode des Moyennes Successives).

Pour chaque arc et chaque classe de trafic (VL et PL), le résultat à l'issue d'une itération est calculé selon la formule :

$$X_n \leftarrow (1-\gamma_n)X_{n-1} + \gamma_n X'_n$$

où :

- X_n est le trafic de la classe sur les arcs à l'itération n ;
- X'_n est le **flux auxiliaire,** issu du calcul de l'itération en cours ;
- $\gamma^n = \dfrac{K_1}{K_2 + n}$, K_1 et K_2 étant des constantes, 1 et 0 par défaut.

Avec les valeurs de K_1 et K_2 par défaut, on obtient : $X_n = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X'_i$. Le flux résultant de la n^ième itération est ainsi la moyenne des flux auxiliaires des n itérations, d'où le nom de méthode des moyennes successives.

Dans le cas d'une affectation avec demande élastique, la demande peut évoluer au cours de la procédure d'équilibre en fonction de l'évolution du coût généralisé, calculé lui aussi à l'aide d'une MSA.

Dans Ariane, le calcul du trafic résultat utilise également le principe d'une combinaison convexe entre le calcul issu de l'itération en cours, et le résultat de l'itération précédente, avec un poids calculé par OD. Nous n'irons cependant pas plus loin dans la comparaison des méthodes de convergence et nous allons nous concentrer sur la comparaison entre les états d'équilibre résultant de chacune des deux lois d'affectation.

5.2 - Illustration du calcul de l'équilibre entre deux routes de type identique

On reprend l'exemple de deux arcs de type de route identique, avec seulement une différence dans leur longueur, celle-ci jouant à la fois sur le coût de circulation et sur le temps de parcours. Nous allons dans un premier temps étudier l'impact de cet écart relatif de la longueur (ici égal à l'écart en coût) sur la répartition des trafics, puis nous verrons également l'importance du niveau de demande.

Dans le cas du prix-temps, la première itération affecte systématiquement tout le trafic sur l'itinéraire le plus court, car il est à la fois moins cher et plus rapide (coût kilométrique et vitesse étant égaux entre les deux arcs). A la deuxième itération, l'itinéraire le plus court étant chargé, son temps de parcours peut devenir supérieur à celui de l'itinéraire le plus long où le trafic vient alors s'affecter. Le flux résultat est alors la moyenne des flux auxiliaires précédents (500 à l'itération 2 ; 666 à l'itération 3).

Le graphe ci-dessous montre les valeurs du flux auxiliaire et du flux résultat à chaque itération sur l'arc le plus court.

Hypothèses :

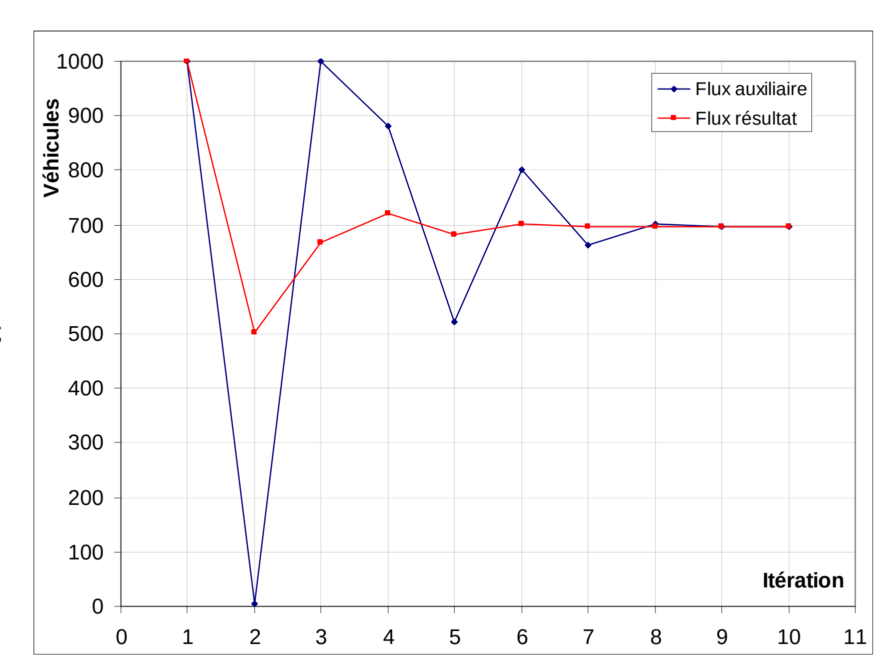
Concurrence entre 2 arcs de type 3 (route bidirectionnelle de 7m)

Coûts et temps de parcours sont issus des paramètres par défaut (table Setra_VDF).

Valeur du temps : moyenne à 15 €/h ; écart-type à 0,7.

Différence de longueur entre les deux arcs :
$\mathbf{L_2}$ = (1+ **10 %**) × $\mathbf{L_1}$

Demande totale :
1000 VL/h. (TMJA : 24 000)



NB : cette demande totale est volontairement exagérée et irréaliste pour un type 3. Ces valeurs permettent de montrer la convergence du processus itératif qui serait trop rapide avec un niveau de demande raisonnable.

La convergence parfaite est atteinte lorsque le flux auxiliaire est égal au flux résultat. On s'aperçoit cependant que le flux résultat converge relativement rapidement (faible variation entre deux itérations à partir de l'itération 6), alors que le flux auxiliaire continue à osciller de façon importante. On reviendra plus en détails sur les problématiques de convergence et des indicateurs de cette convergence au § 7.

Plusieurs applications numériques basées sur l'exemple ci-dessus ont été menées afin de montrer l'impact des différentes hypothèses telles que le niveau de demande ou l'écart de coût (ici via la longueur) entre les deux arcs. On obtient ainsi les états d'équilibres suivants :

Part du trafic sur l'itinéraire 1 (le plus court) et écart de temps de parcours entre les deux itinéraires $(T_1 - T_2)/T_1$		Loi d'Abraham		Prix-Temps	
		% de trafic sur l'arc 1 (le plus court)	Écart de temps de parcours	% de trafic sur l'arc 1 (le plus court)	Écart de temps de parcours
Écart de Longueur : $(L_2 - L_1) / L_1$ (= écart de coût) avec Demande = 1000 VL/h	1.0 %	51 %	0.2 %	52 %	1.3 %
	5.0 %	56 %	1.0 %	61 %	6.0 %
	10.0 %	62 %	1.9 %	70 %	10.4 %
	25.0 %	76 %	3.1 %	88 %	16.7 %
Niveau de demande VL/h : (avec un écart de Longueur de 10%)	1200	59 %	4.0 %	63 %	10.8 %
	1000	62 %	1.9 %	70 %	10.4 %
	800	65 %	-1.0 %	81 %	8.9 %
	600	68 %	-4.3 %	97 %	5.2 %
	500	69 %	- 5.9 %	100 %	0.5 %

On vérifie avec la croissance de la demande que la prise en compte du principe d'équilibrage permet de réduire les écarts entre les deux lois d'affectation. On remarque cependant que l'itinéraire le plus long peut rester inefficace avec le prix-temps lorsque l'écart de coût ou de longueur est très important et lorsque la demande de trafic est insuffisante.

Avec une demande inférieure à 800 VL, la loi d'Abraham affecte une part non négligeable des véhicules sur l'itinéraire qui est à la fois plus cher et plus long en temps (ici jusqu'à 35 %). Dans ces cas, l'itinéraire 1 est alors le plus rapide avec la loi d'Abraham, alors que l'itinéraire 2 est ici toujours plus rapide avec la loi prix-temps.

Lorsque l'équilibre est atteint avec la loi prix-temps et que les deux itinéraires sont empruntés, le temps de parcours sur l'itinéraire 1 le moins cher (ici le plus court en distance) est nécessairement supérieur à celui de l'itinéraire 2 le plus cher (ici le plus long en distance) sinon ce dernier ne serait pas efficace. Les écarts en temps de parcours sont ainsi plus importants avec l'affectation prix-temps.

On peut retenir que pour des types de routes identiques, l'affectation prix-temps charge plus les itinéraires les plus courts en distance. En effet, pour que quelques véhicules aient un intérêt à s'affecter sur l'itinéraire le plus long, il est nécessaire d'augmenter fortement, en le chargeant, le temps de parcours sur l'itinéraire court.

Enfin, que ce soit par rapport aux paramètres de coûts, de longueur, ou même de demande globale, la loi prix-temps réagit de façon plus sensible aux variations des paramètres.

5.3 - Comparaison de l'équilibre entre deux routes

5.3.1 - Méthodologie

Afin de comparer les deux lois d'affectation en tenant compte de l'équilibre via les courbes temps-débit pour un ensemble plus vaste d'hypothèses, il est nécessaire d'implémenter un algorithme itératif. Nous avons choisi de le faire dans un tableur ce qui facilite la visualisation des résultats. Le tableur Excel qui a été implémenté calcule la répartition du trafic d'une O-D entre 2 arcs dont le type est paramétrable, et calcule les temps de parcours en fonction du trafic sur les 2 arcs. Une macro permet de calculer le flux résultat à partir de la répartition calculée et d'un résultat précédent, selon la méthode MSA.

Parmi toutes celles qui ont été effectuées, nous allons présenter et analyser quelques applications numériques qui sont représentatives de l'ensemble des cas possibles.

5.3.2 - Applications numériques

Les graphes en 3 dimensions des pages suivantes sont obtenus en calculant, via ce procédé des moyennes successives sur 100 itérations, l'équilibre entre deux arcs de même type (3 = 7m) pour la première, et de types différents pour la seconde. La longueur de l'arc 1 (L_1) est fixée à 10 km, et on fait varier la longueur de l'arc 2 (L_2) de 4 à 15 km. Le coût et le temps de parcours à vide sur l'arc 2 varient ainsi en fonction de sa longueur, et les temps de parcours sur les deux arcs sont calculés via les courbes temps-débit du Sétra par type de route (donc identiques pour les deux itinéraires dans le premier cas). L'équilibre est calculé pour un niveau de demande de trafic VL sur ces deux itinéraires en concurrence qui varie de 0 à 60 000 VL par jour et pour un sens (niveau irréaliste mais qui permet de comprendre les tendances).

Les hypothèses retenues concernant les valeurs du temps sont les suivantes :

- Abraham : 13.24 €/h.
- Prix-temps : moyenne 17 €/h ; écart-type : 0.7, soit une médiane à 13.31 €/h.

5.3.3 - Présentation des résultats obtenus entre deux routes de type 3 - 7m

Sur la page suivante, les graphes de gauche sont obtenus avec la loi prix-temps, ceux de droite avec la loi d'Abraham.

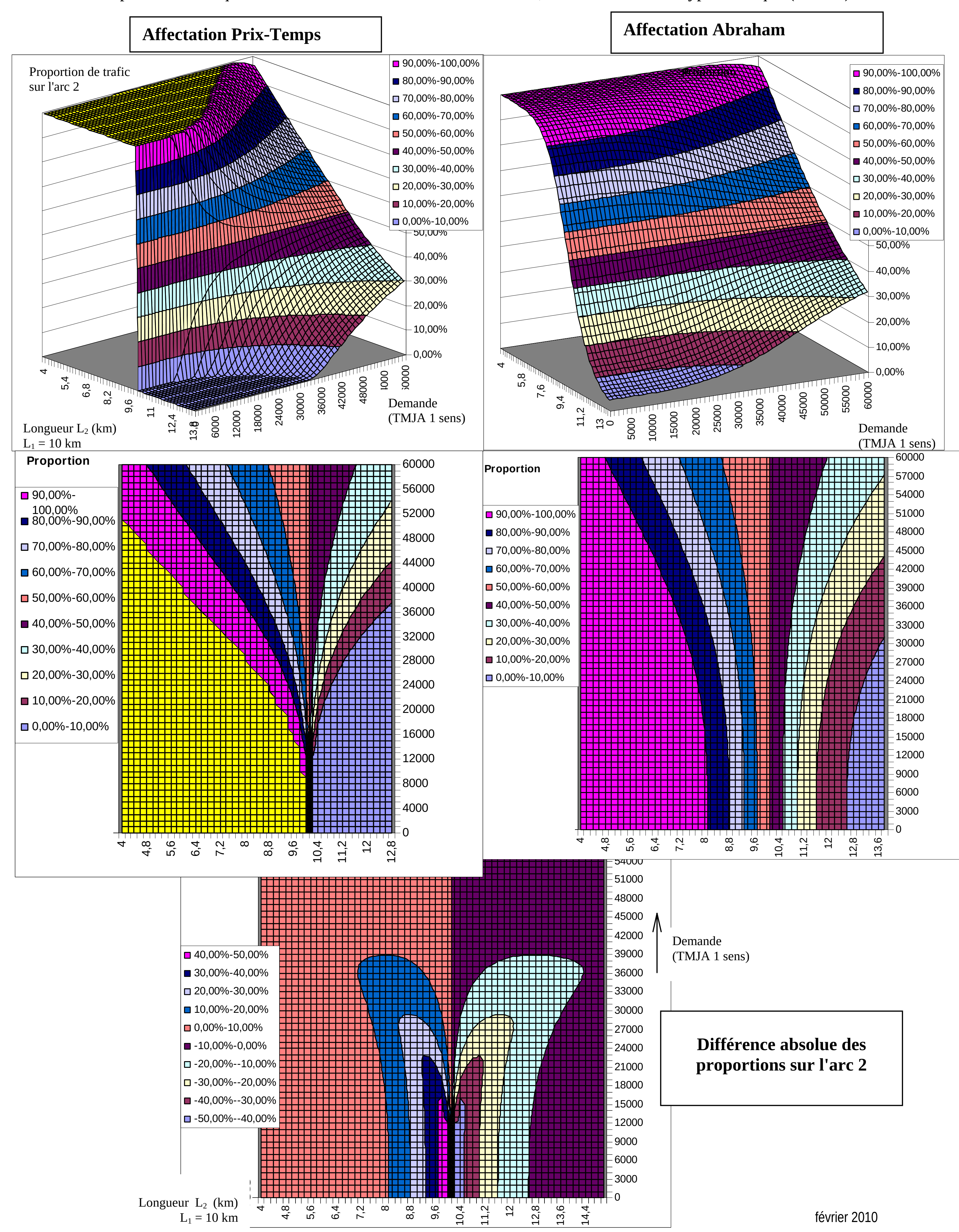
Les trois lignes de graphes présentent des vues différentes pour comparer les résultats obtenus avec les différentes lois.

Sur les deux graphes en haut, la proportion de trafic sur l'arc 2 est représentée sur l'axe vertical et en couleur, en fonction de la demande sur l'OD selon un premier axe (en bas à droite) et en fonction de la longueur de l'itinéraire 2 selon le deuxième axe des abscisses.

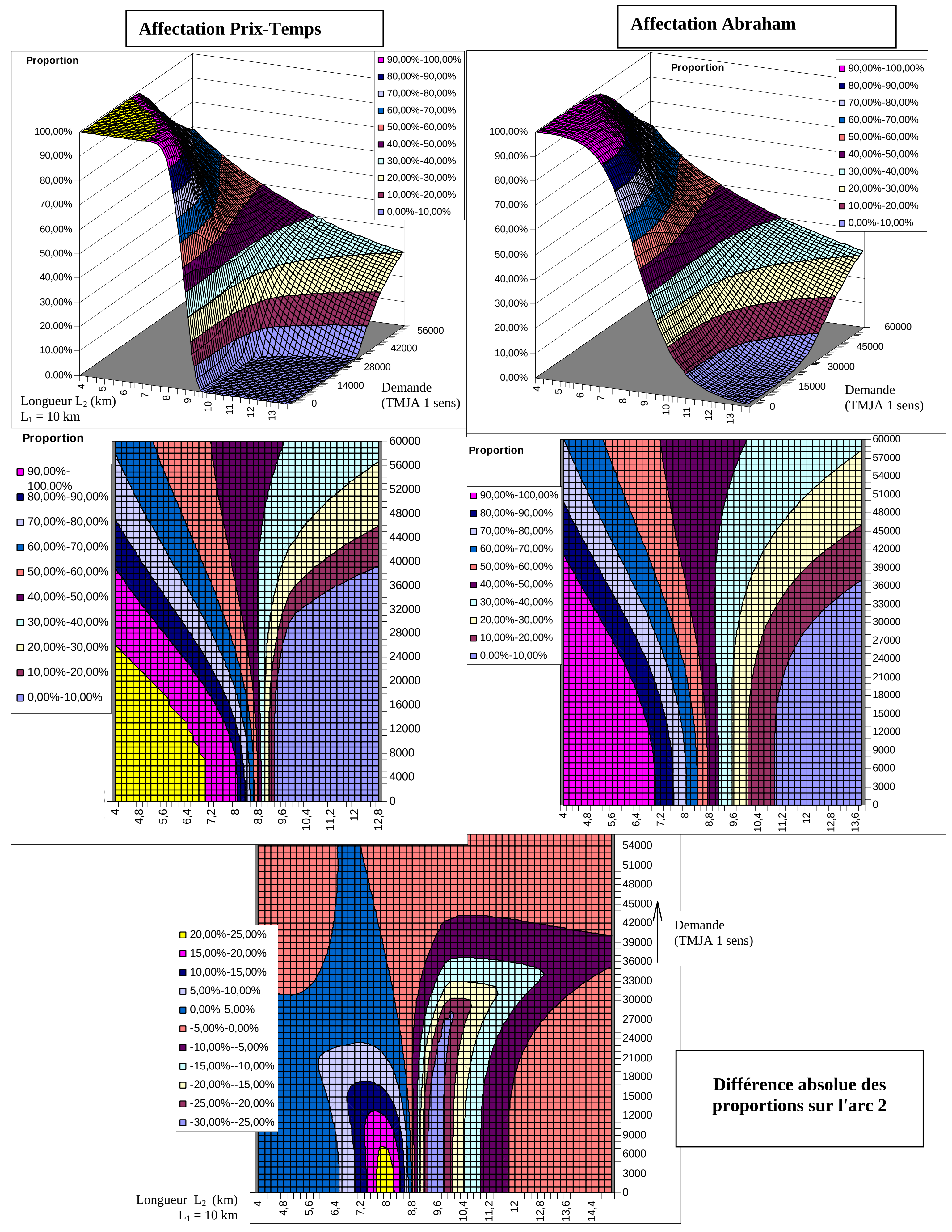
Les deux illustrations au milieu représentent les mêmes résultats, mais avec une vue du dessus de la surface en 3D : seule la couleur permet de distinguer la proportion de trafic.

Le graphe en bas montre la différence entre ces deux graphes, c'est-à-dire la différence absolue entre les proportions sur la route 2 calculée avec la loi prix-temps à gauche, et la loi d'Abraham à droite.

Comparaison des équilibres obtenus avec les 2 lois d'affectation, deux itinéraires de type identique (3 = 7m).



Comparaison des équilibres obtenus avec les 2 lois d'affectation, deux itinéraires de types différents (types 8 et 3)



En analysant la comparaison des deux routes de types identiques (sur les graphes de la première page), on vérifie que plus la longueur de l'itinéraire 2 est courte, plus la proportion de trafic qui s'y affecte est importante. Selon le deuxième axe, on vérifie que plus la demande est importante, plus la répartition s'approche de 50-50%.

Dans ce cas de deux itinéraires de types identiques, on observe de fortes différences entre les deux lois d'affectation lorsque la demande est faible, avec une différence absolue qui va au-delà de 40 % et de – 40 %. Au contraire, lorsque la demande est très importante, les écarts se rapprochent de zéro. Le maximum de la différence correspond aux cas de deux itinéraires très proches en coût. Plus de détails sur la convergence de l'algorithme dans ce cas particulier sont donnés dans le paragraphe 8.

Lorsque la longueur de l'arc 2 est très différente de celle de l'arc 1, les deux lois d'affectation donnent des résultats très proches (à 10 % près) : quasiment tout le trafic sur l'arc 2 pour les petites valeurs de L_2, et proche de 0 % pour les grandes valeurs de L_2.

Lorsque le niveau de la demande est élevé, la proportion de trafic forme une surface très similaire selon les deux lois d'affectation, avec une différence absolue inférieure à 10 %.

En revanche, lorsque la demande est faible, et les itinéraires de longueurs proches, la loi prix-temps est plus sensible que la loi d'Abraham.

La deuxième page de graphes compare les deux itinéraires concurrents de type différent :

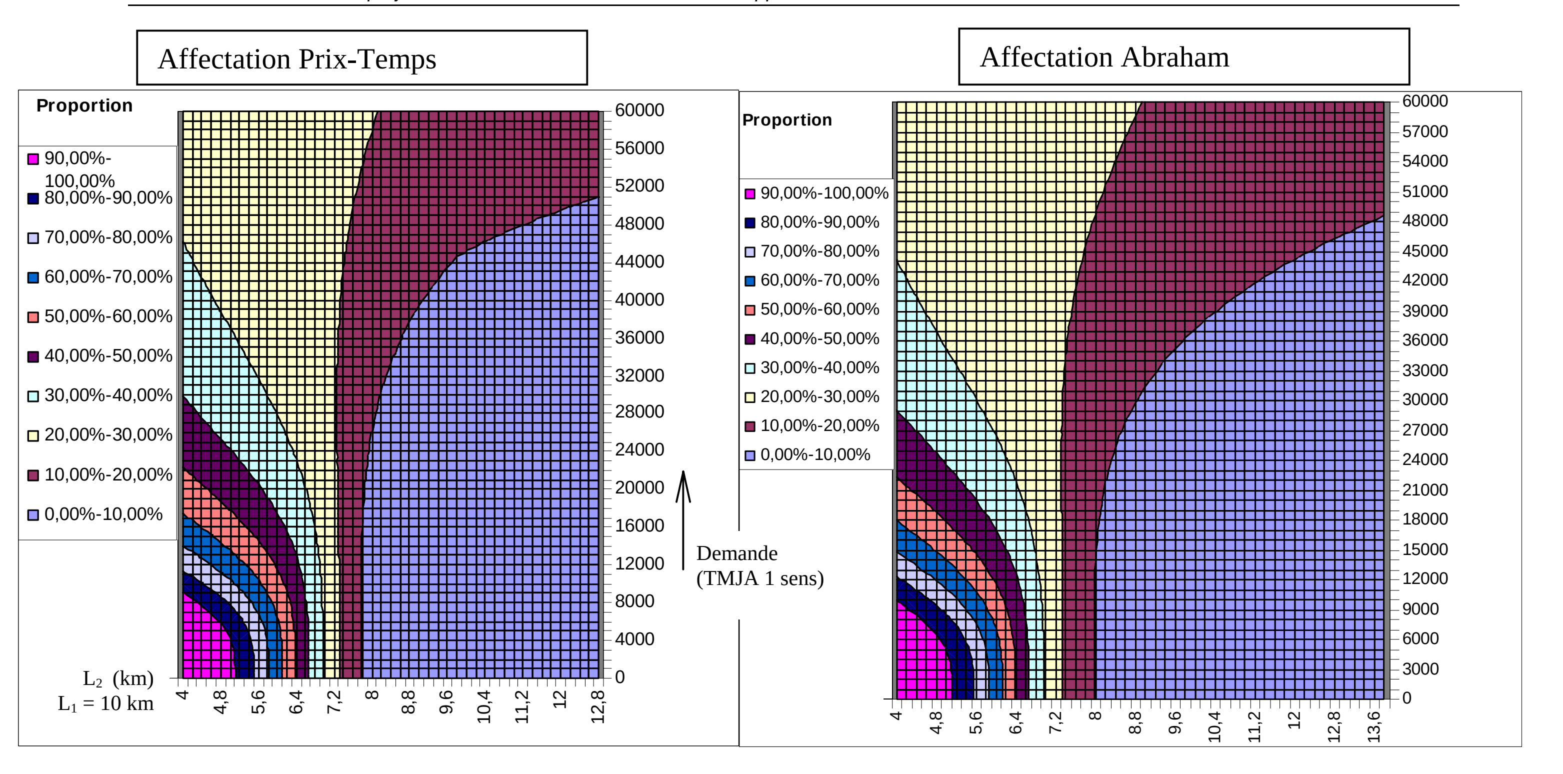
Itinéraire 1	Itinéraire 2
Type : 8 (autoroute concédée 2x2)	Type : 3 (bidirectionnelle largeur 7m)
Longueur 1 : 10 km.	Longueur 2 : variable

On peut faire les mêmes observations générales que dans le cas précédent. En effet, la différence absolue entre les deux lois d'affectation est maximale pour les faibles niveaux de demande, mais la différence maximale est deux fois moins importante que dans le cas précédent. On atteint une différence absolue de + 20 % avec Prix-Temps sur l'itinéraire 2 avec une longueur de 8km, et – 25 % avec une longueur de 9,5km.

De ces analyses, on s'aperçoit que plus les itinéraires sont différenciés, plus les deux lois donnent des résultats proches.

Ainsi, en comparant des itinéraires très contrastés, l'un de type 8 (autoroute concédée 2x2) et l'autre de type 21 (2 voies urbaines normales) la différence absolue maximale tombe à 15 %, comme le montrent les deux illustrations ci-dessous qui sont très similaires.

Itinéraire 1	Itinéraire 2
Type : 8 (autoroute concédée 2x2)	Type : 21 (2 voies urbaines normales)
Longueur : 10 km.	Longueur : variable



Si l'on compare les résultats des analyses précédentes entre elles, on s'aperçoit que les paramètres des itinéraires comme la longueur des arcs, le type de route ou les courbes temps-débit, ont un impact largement prédominant dans les résultats par rapport à la loi d'affectation.

En d'autres termes, l'effet d'un changement de loi d'affectation a peu d'incidence comparée au paramétrage du réseau.

5.4 - Calculs des avantages liés aux usagers – résultats moyens pour l'OD

Pour terminer la comparaison théorique entre les deux lois d'affectation, on peut évaluer les différences obtenues en terme d'avantages liés aux usagers. Par exemple pour le temps de parcours, on calcule le temps moyen pour l'OD (égal au temps moyen sur le réseau), à partir de la formule :

$$T_{OD} = T_1 \text{ x } F_1 / F_{OD} + T_2 \text{ x } F_2 / F_{OD}$$

L'avantage de temps entre situations de projet et de référence est ensuite obtenu par la différence des temps totaux, et donc aussi celle des temps moyens : $A_{Temps} = (T_{OD\ réf} - T_{OD\ prj}) \text{ x } F_{OD}$

L'avantage étant proportionnel au nombre d'usagers, les différences entre les deux lois d'affectation sont proportionnelles avec la demande de trafic. On s'est aperçu que si l'on représentait les différences en terme d'avantage, seules celles du niveau maximal de demande sont visibles.

Le principe est identique pour tous les avantages des usagers (temps, péages, malus, etc.). Mais pour ce qui est des avantages liés aux coûts de circulation, ceux-ci étant fixés pour chacune des routes quelle que soit la loi d'affectation, les différences de résultats entre les deux lois ne résultent que des différences en répartition de trafic, déjà étudiée plus haut. On se concentre ainsi sur l'avantage en temps, en analysant le temps moyen par usager T_{OD}.

Rien qu'en travaillant sur $T_{OD\ prj}$, on pourra conclure sur les avantages usagers pour une situation de projet avec deux itinéraires en concurrence et avec une situation de référence où il n'y a qu'un seul itinéraire. En effet dans ce cas, la situation de référence est identique quelle que soit la loi d'affectation (le temps moyen de référence ne dépend que de la courbe temps-débit de la route en référence), et la différence sur l'avantage de temps est égale à celle sur le temps moyen en situation de projet (multipliée par la demande de trafic).

On choisit de comparer les temps moyens obtenus pour un cas de concurrence déjà étudié plus haut entre deux routes, l'une de type 3 (route à 2 voies bidirectionnelles) avec une longueur fixée à 10 km, l'autre de type 8 (autoroute concédée à 2x2 voies) et une longueur qui varie entre 4 et 15 km, tout en faisant varier le niveau de demande. Contrairement au cas étudié précédemment, c'est la longueur de l'autoroute que l'on fait varier.

Les résultats présentés sur les graphes de la page suivante sont très similaires avec l'une ou l'autre des lois d'affectation. On peut faire de nombreuses observations communes aux deux lois.

De façon générale le temps moyen par OD augmente avec la longueur de l'autoroute, et aussi avec le niveau de demande. Mais lorsque la longueur de l'autoroute est inférieure à 12 km et pour une demande en dessous de 20 000 veh/j (quart en bas à gauche des graphes), tout le trafic (ou presque) s'affecte sur l'autoroute, et le temps moyen ne dépend que de la longueur de celle-ci.

Lorsque la longueur de l'autoroute est supérieure à 12 km, la majeure partie du trafic s'affecte sur la route secondaire, et le temps moyen dépend surtout de la demande de trafic.

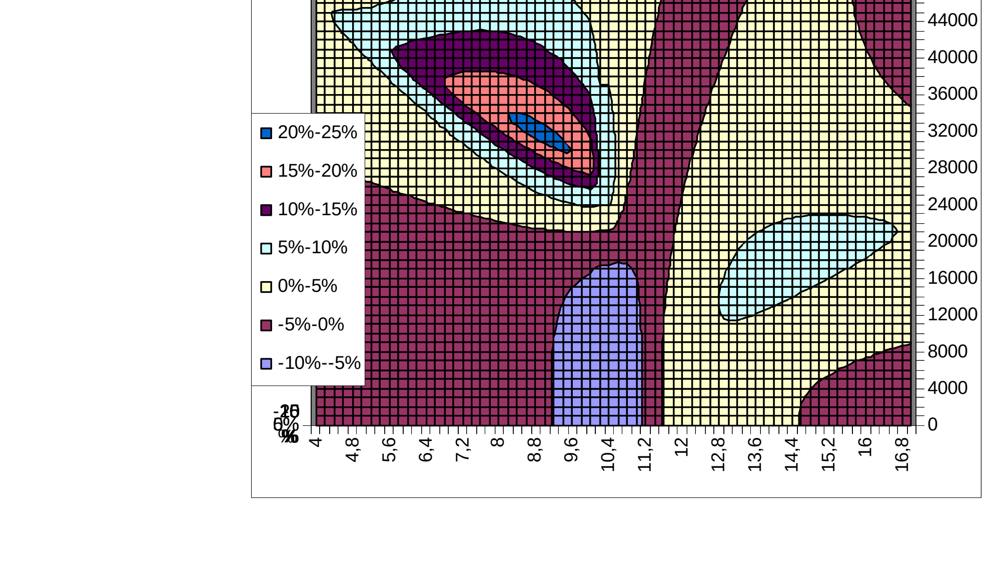
Sur le troisième graphe de comparaison en bas, on remarque que la différence relative entre le temps moyen obtenu avec Abraham et prix-temps $[(T_{prix\text{-}temps} – T_{Abraham}) / T_{Abraham}]$ ne dépasse pas 25 %. Elle est comprise entre –10 et 10 % pour la majeure partie de l'ensemble des variables possibles, sauf dans une petite zone proche du centre du graphe : il s'agit de la zone où le temps moyen diminue lorsque la longueur augmente. Ce phénomène qui peut sembler paradoxal, apparaît à cause de l'équilibre usager : les usagers ne s'affectent plus à 100 % sur l'autoroute avec l'augmentation de sa longueur, et la diminution des temps avec cette moindre charge compense l'augmentation du temps avec la longueur. Ce phénomène, observé pour les deux lois d'affectation, est ici plus important avec la loi prix-temps car elle est plus sensible aux paramètres du réseau. Aussi surprenant que cela puisse paraître, nous avons ici un exemple théorique de projet où le rallongement de l'autoroute améliore les gains de temps totaux des usagers.

Loi Prix-Temps

Temps moyen (min)
TMJA (1sens)
12-13
11-12
10-11
9-10
8-9
7-8
6-7
5-6
4-5
3-4
2-3
1-2
0-1
60000
56000
52000
48000
44000
40000
36000
32000
28000
24000
20000
16000
12000
8000
4000
0
L2 (km)
[L1 = 10 km]
4
4,8
5,6
6,4
7,2
8
8,8
9,6
10,4
11,2
12
12,8
13,6
14,4
15,2

Loi d'Abraham

Temps moyen (min)
TMJA (1sens)
12-13
11-12
10-11
9-10
8-9
7-8
6-7
5-6
4-5
3-4
2-3
1-2
0-1
60000
56000
52000
48000
44000
40000
36000
32000
28000
24000
20000
16000
12000
8000
4000
0
L2 (km)
[L1 = 10 km]
4
4,8
5,6
6,4
7,2
8
8,8
9,6
10,4
11,2
12
12,8
13,6
14,4
15,2



On s'aperçoit que les différences entre les deux lois d'affectation en termes d'avantages liés aux usagers sont globalement plus faibles que celles liées aux répartitions de trafic. Là encore, les paramètres des itinéraires comme la longueur des arcs, le type de route ou les courbes temps-débit, ont un impact largement prédominant dans les résultats par rapport à la loi d'affectation. Aussi, à partir d'autres analyses non restituées ici, on confirme l'intuition que les courbes temps-débit ont un impact prédominant au niveau des avantages de temps.

6 - Comparaison des courbes temps-débit

Les courbes temps-débit décrivent l'évolution du temps de parcours par kilomètre ou de la vitesse sur un tronçon en fonction du débit en entrée de section, c'est-à-dire de la demande de trafic. Elles sont généralement calées à partir de données recueillies sur le terrain, mais peuvent également faire intervenir des modèles d'écoulement du trafic.

Sans chercher à analyser les principes de construction des différentes courbes temps-débit, ce qui ferait l'objet d'un rapport à part entière, nous nous contentons d'indiquer ici les différentes formulations des courbes utilisées dans Ariane et les modules Sétra de TransCAD, et comparons les courbes résultantes.

Dans Ariane comme avec TransCAD, il est possible de prendre en compte des pénalités de temps aux carrefours. Les courbes temps-débit étudiées ici sont valables seulement en section, et donnent des temps de parcours en moyenne annuelle.

6.1 - Formulations des courbes utilisées dans Ariane

Les courbes temps-débit utilisées dans Ariane sont des courbes polynomiales composées de deux termes. Le premier, de degré 2, décrit l'évolution du temps de parcours dans des conditions fluides. Le deuxième, de degré 5, n'est utilisé qu'à partir d'un certain débit, appelé débit de saturation, afin de décrire la probabilité d'apparition de la congestion et ses conséquences sur le temps de parcours. Cette notion de débit de saturation est différente de la notion de capacité utilisée habituellement en exploitation.

Différentes méthodes ont été employées pour construire les formulations dont on donne un exemple ci-dessous, pour les sections en rase campagne.

Temps de parcours des VL : terme fluide + termes saturés

$$T_{VL} = a_{00} + \frac{24}{\varphi_{VL}} \times a_{10}\left(\frac{Q_{VL}}{24}\right) + 1.106 \times a_{01}\left(\frac{Q_{PL}}{24}\right) + \left(-8.46 + \frac{53872}{(\varphi_{VL})^3}\right) \times a_{30}\left(\frac{Q_{VL}}{24}\right)^3 + \frac{714}{(\varphi_{VL})^2} \times a_{21}\left(\frac{Q_{VL}}{24}\right)^2 \bullet \left(\frac{Q_{PL}}{24}\right)$$

$$+ \frac{61}{C_a} \times \left[2.65 \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^5 + 7.01 \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^4 \bullet \left(\frac{Q_{PL}}{\varphi_{PL} C_a}\right)\right] + \left[-0.986.10^{-3} \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^5 + 5.694.10^{-3} \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^4 \bullet \left(\frac{Q_{PL}}{\varphi_{PL} C_a}\right)\right]$$

Temps de parcours des PL : terme fluide + termes saturés

$$T_{PL} = b_{00} + 1.106 \times a_{10}\left(\frac{Q_{VL}}{24}\right) + 1.32 \times a_{01}\left(\frac{Q_{PL}}{24}\right) + \frac{714}{(\varphi_{VL})^2} \times a_{30}\left(\frac{Q_{VL}}{24}\right)^3 + \left(1.404 + \frac{15.19}{\varphi_{VL}}\right) \times a_{21}\left(\frac{Q_{VL}}{24}\right) \bullet \left(\frac{Q_{PL}}{24}\right)$$

$$+ \frac{61}{C_a} \times \left[0.75 \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^5 + 0.60 \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^4 \bullet \left(\frac{Q_{PL}}{\varphi_{PL} C_a}\right)\right] + \left[(0.866 - 0.114\varphi_{VL}).10^{-3} \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^5 + 0.01 \bullet \left(\frac{Q_{VL}}{\varphi_{VL} C_a}\right)^4 \bullet \left(\frac{Q_{PL}}{\varphi_{PL} C_a}\right)\right]$$

Coefficients a_{ij} utilisés dans les formules, à partir de constantes par type de route.
Les a_{ij} sont fonction du coefficient de rampe R et du coefficient de visibilité λ

$$a_{00} = AM_{00VL} + AP_{00VL} \bullet R^2 + AN_{00VL} \bullet R \bullet \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right) + AS_{00VL} \bullet \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)$$

C_a : débit moyen de saturation de l'arête

$$a_{10} = \left[AM_{10} + AN_{10} \bullet R + AP_{10} \bullet R^2 + AQ_{10} \bullet (1 - \lambda)\right] \bullet 24$$

Facteurs horaires : φ_{VL}=14.69 et φ_{PL}=18.20 par défaut

$$a_{01} = \left[AM_{01} + AN_{01} \bullet R + AP_{01} \bullet R^2 + AQ_{01} \bullet (1 - \lambda)\right] \bullet 24$$

$$a_{30} = \left[AM_{30} \bullet \left(1 + AN_{30} \bullet R + AP_{30} \bullet R^2\right)\right] \bullet 24$$

$$b_{00} = AM_{00PL} + AP_{00PL} \bullet R^2 + AN_{00PL} \bullet R \bullet \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right) + AS_{00PL} \bullet \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)$$

Pour plus de détails, on se réfèrera au manuel d'utilisation d'Ariane.

Ces formulations utilisent de nombreux coefficients, et prennent également en compte différents paramètres tels que la visibilité λ, la rampe R, la sinuosité, la taille des agglomérations. Elles sont donc analytiquement difficiles à étudier et à expertiser.

6.2 - Courbes utilisées dans TransCAD

TransCAD propose différentes courbes temps-débit (en anglais, Volume Delay Function) pour les affectations dans le logiciel support. Parmi elles, on trouve les courbes BPR (pour Bureau of Public Roads). Ce type de courbe est reconnu internationalement et est largement utilisé dans tous les pays. Ces courbes sont calibrées à partir de débits et de temps de parcours mesurés et moyennés sur une heure.

Les courbes BPR sont de forme exponentielle et utilisent la notion de capacité utilisée habituellement en exploitation. Elles décrivent l'évolution du temps de parcours kilométrique sur l'ensemble de la plage de demande et donc, ne nécessitent pas un deuxième terme d'ajustement pour décrire les conséquences de la congestion.

Ce sont ces courbes qui sont implémentées dans les modules Sétra de TransCAD. Les temps de parcours en charge pour les VL et pour les Camions ou PL, en minutes par kilomètre, sont obtenus par les relations :

$$tk_{mV} = tk_{0V} \times \left[1 + \gamma_V \times \left(\frac{Q_V + e \times Q_C}{\kappa}\right)^{\alpha_V}\right] \text{ pour les VL}$$

$$tk_{mC} = tk_{0C} \times \left[1 + \gamma_C \times \left(\frac{Q_V + e \times Q_C}{\kappa}\right)^{\alpha_C}\right] \text{pour les PL}$$

- tk_{0V} et tk_{0C} sont les temps de parcours des VL et PL de l'arc à vide en minutes par kilomètre, définis au niveau de l'arc, ou calculés à partir de la table de typologie, éventuellement en fonction du relief ;
- γ_V et γ_C sont les proportions d'augmentation du temps à la saturation ;
- e est le coefficient d'équivalence entre PL et VL, lu dans la table de typologie E ;
- α_V et α_C, sont les paramètres de congestion, lus dans la table de typologie (ALPHA_V et ALPHA_C) ;
- Q_V et Q_C, sont les flux équivalents de VL et PL utilisés pour le calcul du temps de parcours (en véhicules par heure), obtenus à partir des facteurs de concentration χ_V et χ_C de la table de typologie (CHI_V et CHI_C) d'après les formules $Q_V = x_v \times \chi_v$ et $Q_C = x_C \times \chi_C$ où x_V et x_C désignent les flux affectés VL et PL en TMJA/24 (en véhicules par heure) – plus de détails dans la note d'info sur les facteurs de concentration [18] ;
- κ est la capacité de l’arc par sens, en unité de voiture particulière (uvp) : elle est définie au niveau des arcs ou lue dans la table de typologie (CAPACITE).

Tous ces paramètres sont définis soit dans la table de données du réseau, soit via la table de typologie Setra_VDF (*cf.* Annexe 4), et sont donc modifiables par l'utilisateur, par exemple en fonction du milieu étudié. Cela offre une grande souplesse d'utilisation.

Les courbes utilisées dans les modules Sétra ont été calibrées sur des données observées ou extrapolées à partir de celles-ci pour paramétrer certains types de routes intermédiaires.

La méthode de calcul d'écoulement des flux sur les arcs autoroutiers est celle préconisée par le rapport technique de novembre 2001 publié par le Sétra : *Fonction temps-débit sur les autoroutes interurbaines – Rénovation des relations entre temps de parcours et débit pour la simulation du trafic*.

Les relations temps-débit sur les arcs interurbains non autoroutiers ont fait l'objet d'études du Sétra dans la continuité de celles effectuées sur les autoroutes en 2000-2001 qui ont abouti à un document provisoire intitulé *Fonction temps-débit sur les routes bidirectionnelles interurbaines*. Ce rapport a permis d'évaluer les valeurs des différents paramètres de cette formulation uniquement pour les routes de 7m (type 3 dans la table de typologie). Pour les autres types d'arcs, les paramètres ont été extrapolés.

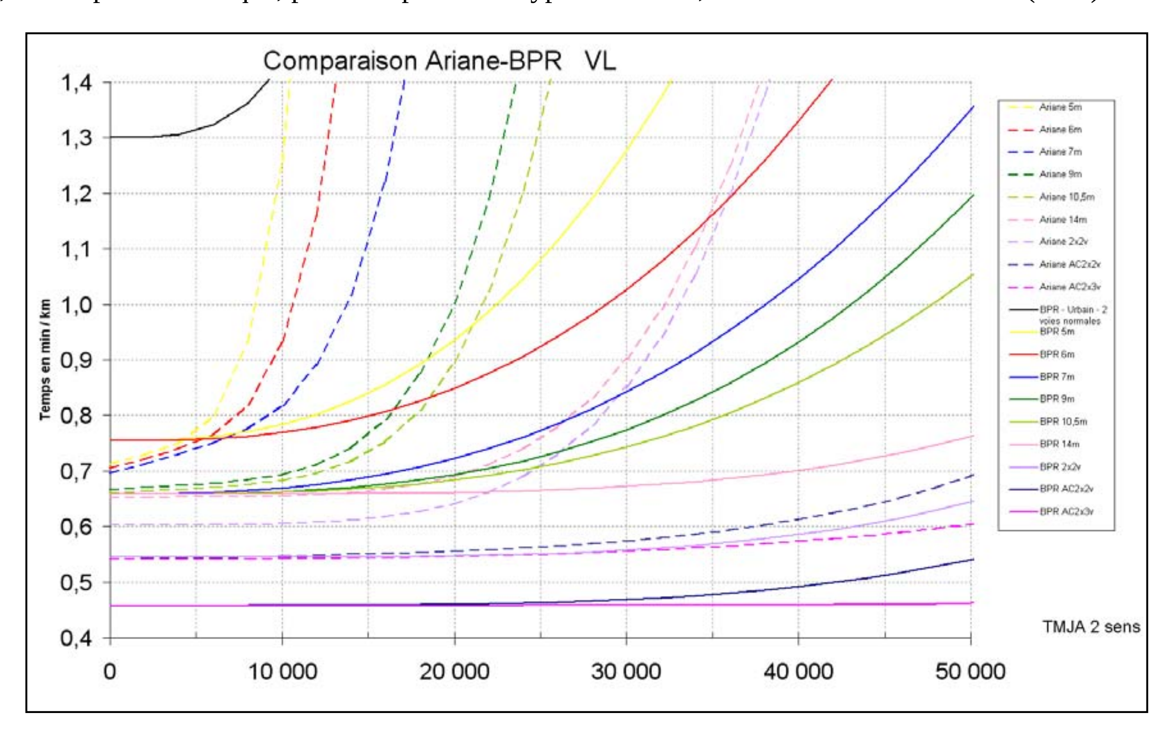
Les courbes de temps de parcours des sections urbaines ont été calées sur les courbes Davis, utilisées dans les modèles urbains.

On peut noter enfin que le calcul des temps de parcours pour les traversées de petites agglomérations correspondant au type 20 a été spécifié selon le rapport d'étude : *Modélisation des temps de traversée des petites agglomérations - Sétra, Cété NP, septembre 2005*. Pour ce type de route, le temps de parcours ne dépend pas du niveau de trafic, mais seulement des caractéristiques de la traversée d'agglomération.

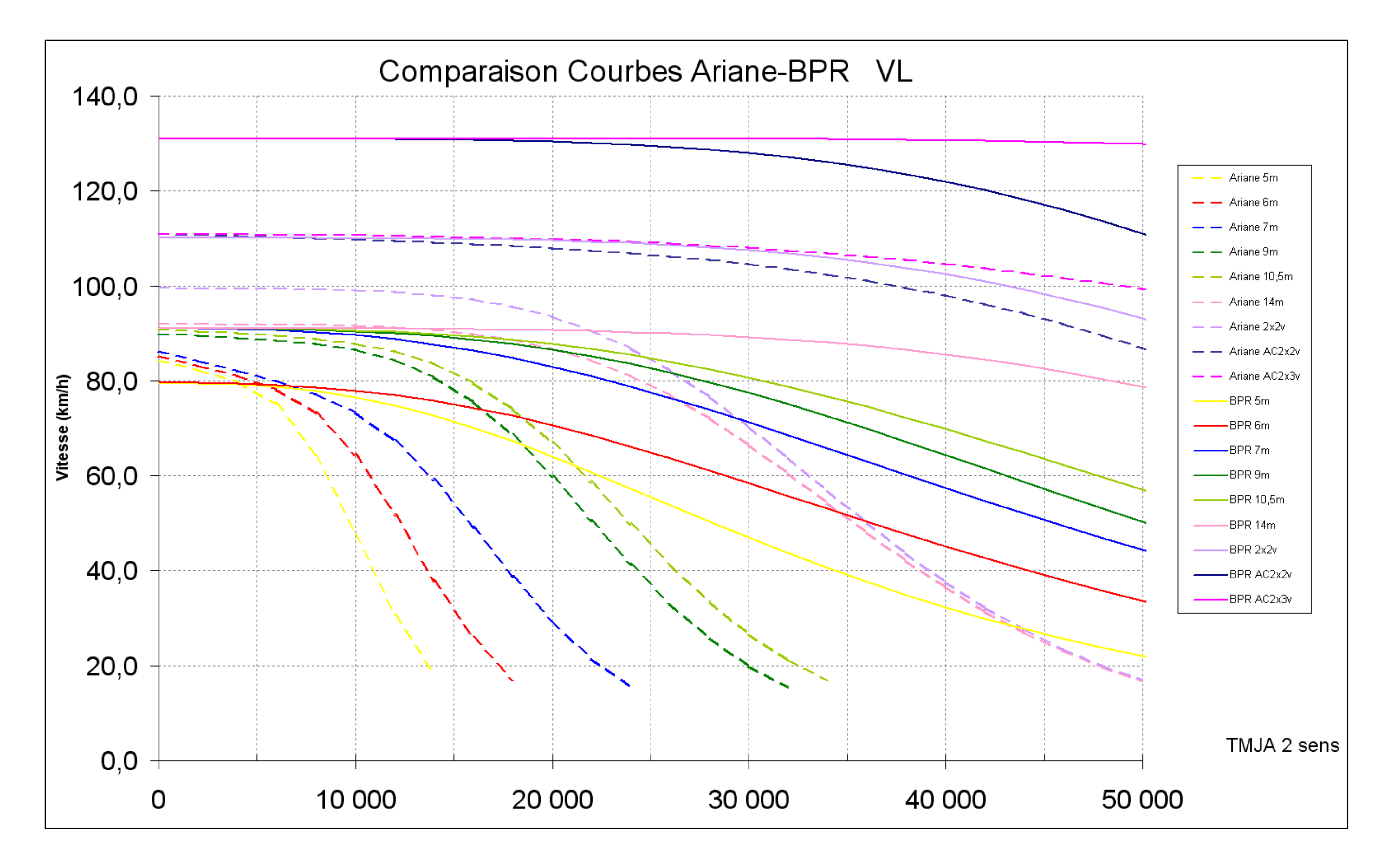
6.3 - Comparaison des courbes Ariane et TransCAD

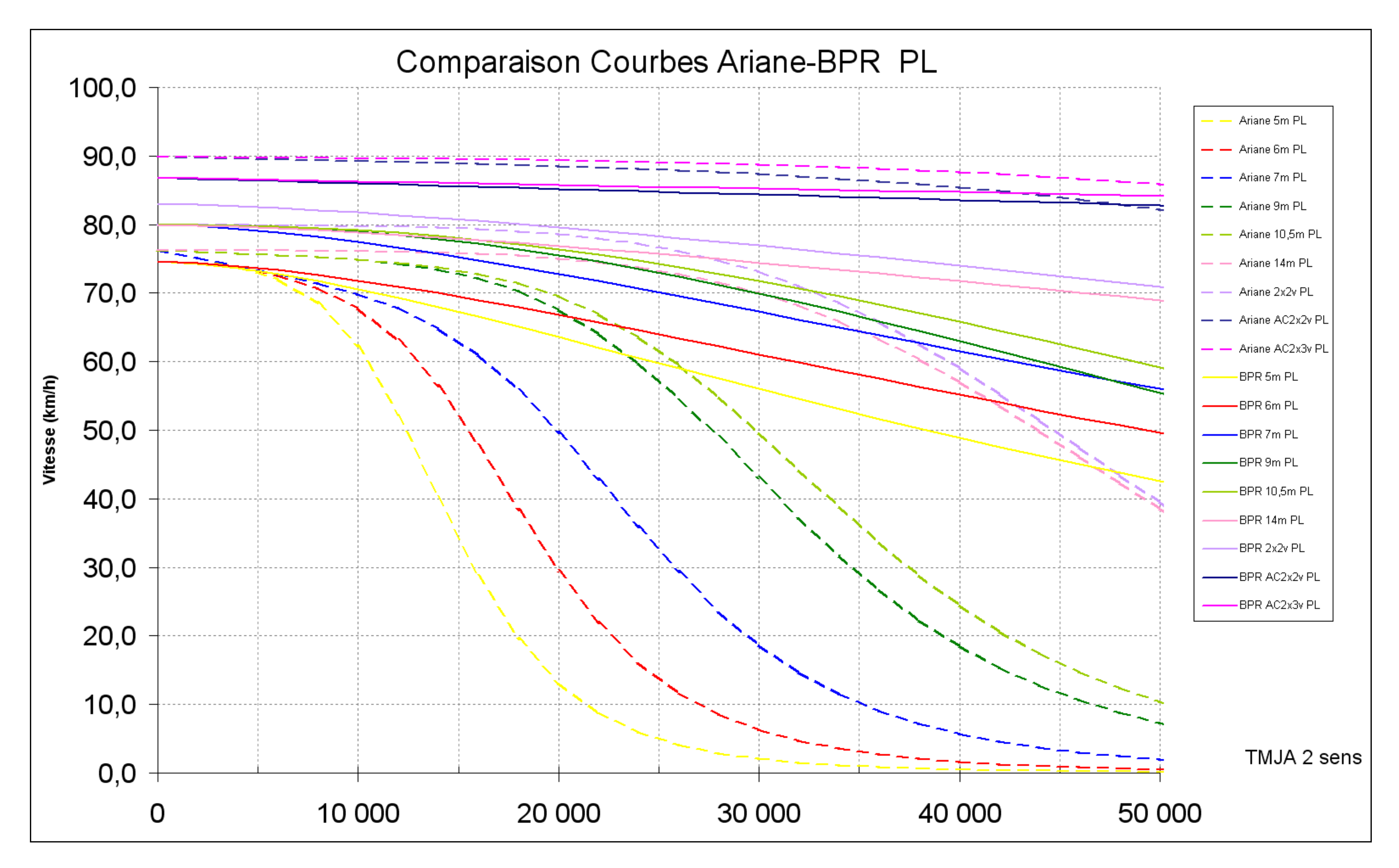
Notons tout d'abord qu'il n'est pas directement possible de comparer le paramétrage des courbes Ariane et TransCAD, en particulier les débits de saturation avec les capacités, ou les phi avec les facteurs de concentration, car les concepts sous-tendant ces paramètres sont différents.

On peut en revanche comparer les courbes à l'aide des graphiques suivants. Ci-dessous, les courbes temps-débit des VL, en temps kilométrique, pour une partie des types de routes, avec Ariane et TransCAD (BPR).



Ces courbes permettent de visualiser comment évolue le temps de parcours en fonction de la charge. Les courbes suivantes représentent quant à elles la relation débit-vitesse pour les VL et les PL. On les obtient simplement avec la formule : Tkm (en min/km) = 60 / Vitesse (en km/h).


Comparaison Courbes Ariane-BPR VL
Vitesse (km/h)
140,0
120,0
100,0
80,0
60,0
40,0
20,0
0,0
0
10 000
20 000
30 000
40 000
50 000
TMJA 2 sens
Ariane 5m
Ariane 6m
Ariane 7m
Ariane 9m
Ariane 10,5m
Ariane 14m
Ariane 2x2v
Ariane AC2x2v
Ariane AC2x3v
BPR 5m
BPR 6m
BPR 7m
BPR 9m
BPR 10,5m
BPR 14m
BPR 2x2v
BPR AC2x2v
BPR AC2x3v


Comparaison Courbes Ariane-BPR PL
Vitesse (km/h)
100,0
90,0
80,0
70,0
60,0
50,0
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
0
10 000
20 000
30 000
40 000
50 000
TMJA 2 sens
Ariane 5m PL
Ariane 6m PL
Ariane 7m PL
Ariane 9m PL
Ariane 10,5m PL
Ariane 14m PL
Ariane 2x2v PL
Ariane AC2x2v PL
Ariane AC2x3v PL
BPR 5m PL
BPR 6m PL
BPR 7m PL
BPR 9m PL
BPR 10,5m PL
BPR 14m PL
BPR 2x2v PL
BPR AC2x2v PL
BPR AC2x3v PL

En ce qui concerne le paramétrage des autres types de routes avec les modules Sétra, il faut noter que :

- les courbes nommées BPR AC, pour Autoroutes Concédées (types 8, 9 et 90), sont communes avec les Autoroutes non concédées (types 13, 14, 140) ;
- la courbe nommée BPR 2x2voies correspond aux types de routes :
  - (7) 2x2 voies carrefour plan (dont la vitesse à vide est légèrement inférieure),
  - (12) 2x2 voies carrefour giratoire,
  - (10) 2x2 voies (route express) ;
- la courbe correspondant au type (11) - 7m dénivelée (route express) qui n'est pas représentée, se trouve à mi-chemin entre les courbes des types 7m et 2x2 voies.

La comparaison des courbes entre les deux logiciels montre que les différences sont très importantes. De façon générale, les différences entre les courbes pour un même type de route sont au moins du même ordre de grandeur que les différences entre types à l'intérieur de chaque outil.

On remarque dans les graphes précédents que les courbes utilisées sous Ariane sont très, voire trop, pénalisantes. Par exemple, la courbe VL pour une bidirectionnelle de 7 m prévoit une vitesse moyenne annuelle de 40 km/h pour un TMJA 2 sens de 18 000 véh/j. C'est l'une des raisons qui ont amené leur mise à jour.

Le paramétrage des courbes BPR donne donc des vitesses beaucoup moins pénalisantes que les courbes Ariane. C'est particulièrement le cas des routes bidirectionnelles. On remarque également que pour les faibles débits, les courbes Ariane rendent compte d'une gêne entre les usagers alors que les vitesses BPR sont constantes sur une certaine plage. Cela est dû au paramètre γ_V qui est faible pour les courbes interurbaines.

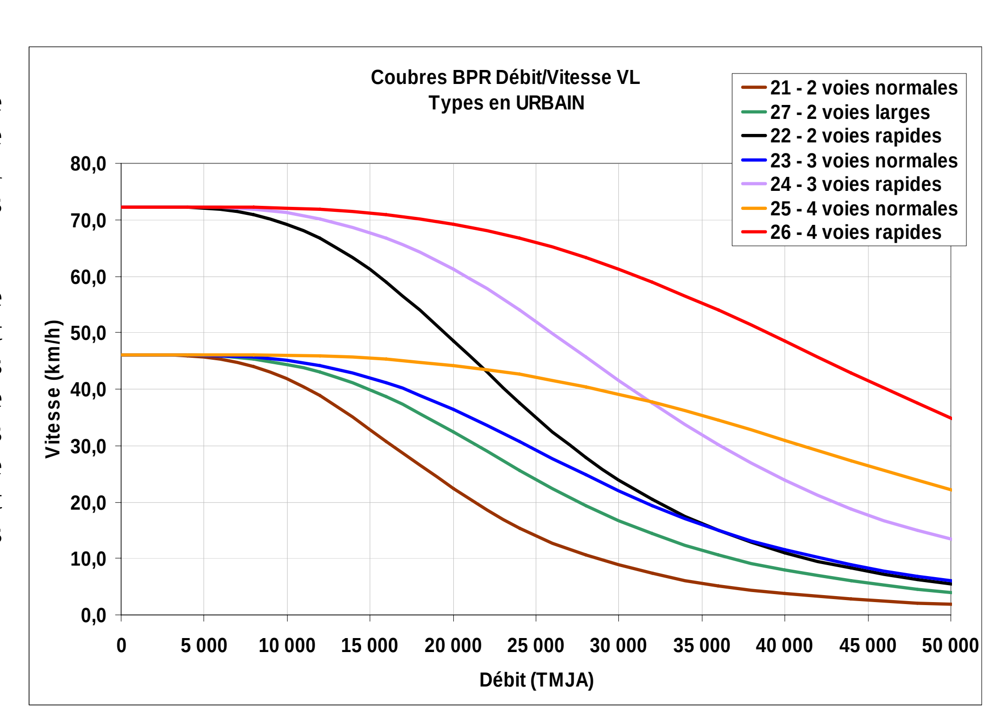
Pour les courbes temps-débit des PL, le paramétrage des courbes BPR est également beaucoup moins pénalisant que celui des courbes Ariane.

Il est important de préciser que pour des volumes élevés, il est normal que les vitesses PL soient supérieures à celles des VL. Ceci est dû au fait que les vitesses ici mentionnées sont des moyennes annuelles. En effet, alors que les VL sont plus concentrés aux heures de pointe, les PL se répartissent de façon plus homogène au cours de la journée, et ont ainsi de meilleures conditions de circulation en moyenne.

Avec ces paramètres, les courbes BPR nécessitent de coder les traversées d'agglomération à l'aide des types de routes qui conviennent, sous peine de surestimer fortement l'affectation des véhicules sur les routes de type bidirectionnelles.

Le graphe ci-contre montre que pour les types urbains le paramétrage des courbes BPR dans les modules Sétra est plus pénalisant.

Si on modélise de manière détaillée un réseau urbain, il faut être vigilant au niveau du temps perdu aux carrefours. Ceux-ci ne sont pas pris en compte dans les courbes temps-débit. Dans Ariane comme dans TransCAD, il est cependant possible d'ajouter des pénalités aux carrefours.



7 - Analyse de la convergence

Parce que le modèle prix-temps est relativement sensible aux paramètres, il apparaît important d'étudier la convergence du processus d'affectation. Nous aurions pu chercher à évaluer les différences dans l'efficacité des algorithmes d'Ariane et des modules Sétra à converger, mais cela n'a qu'un intérêt secondaire, étant donné que la durée des calculs est également liée à la taille des réseaux.

Les modules Sétra fournissent deux indicateurs de convergence de l'affectation. Il s'agit de l'indicateur "Oméga", et de l'écart maximum entre flux auxiliaire *X'* et flux résultat *X* pour chaque itération. **Ils sont calculés à partir des formules suivantes** :

- Écart de trafic sur l'arc *a* pour la classe *c* (*VL* ou *PL*) pour l'itération *n* $= X_{ac}(n-1) - X'_{ac}(n)$
- Oméga = $\sum_{arcs}\left(\frac{X_a(n-1) - X'_a(n)}{C_a}\right)^2$ x La

Nous allons étudier la convergence de l'algorithme sur la base d'un cas précédemment étudié.

Hypothèses :

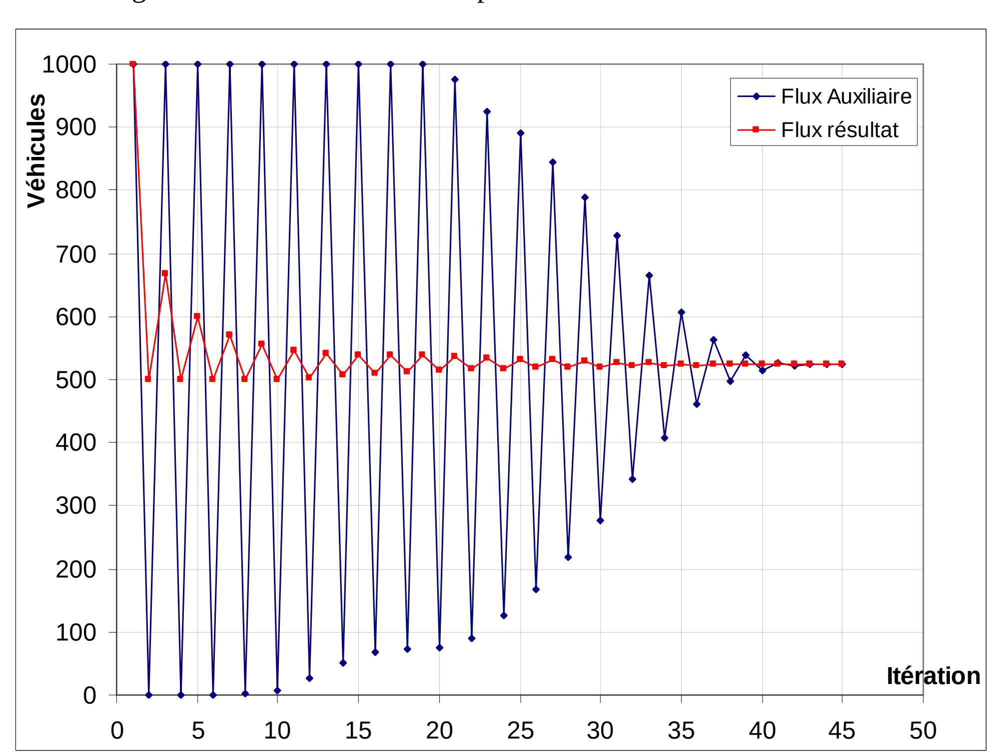
2 arcs de type 3 (route bidirectionnelle de 7m)

Différence de longueur entre les deux arcs : 1 %.

Demande totale : 1000 VL/h.

(TMJA : 24 000)

NB : les deux itinéraires sont volontairement très proches et la demande forte pour accentuer les phénomènes à observer



Le graphe ci-dessus représente le flux auxiliaire sur l'arc le plus court. On observe de fortes oscillations pendant plus de 20 itérations : pour une itération sur deux, 100 % du trafic s'affecte sur l'arc le plus court.

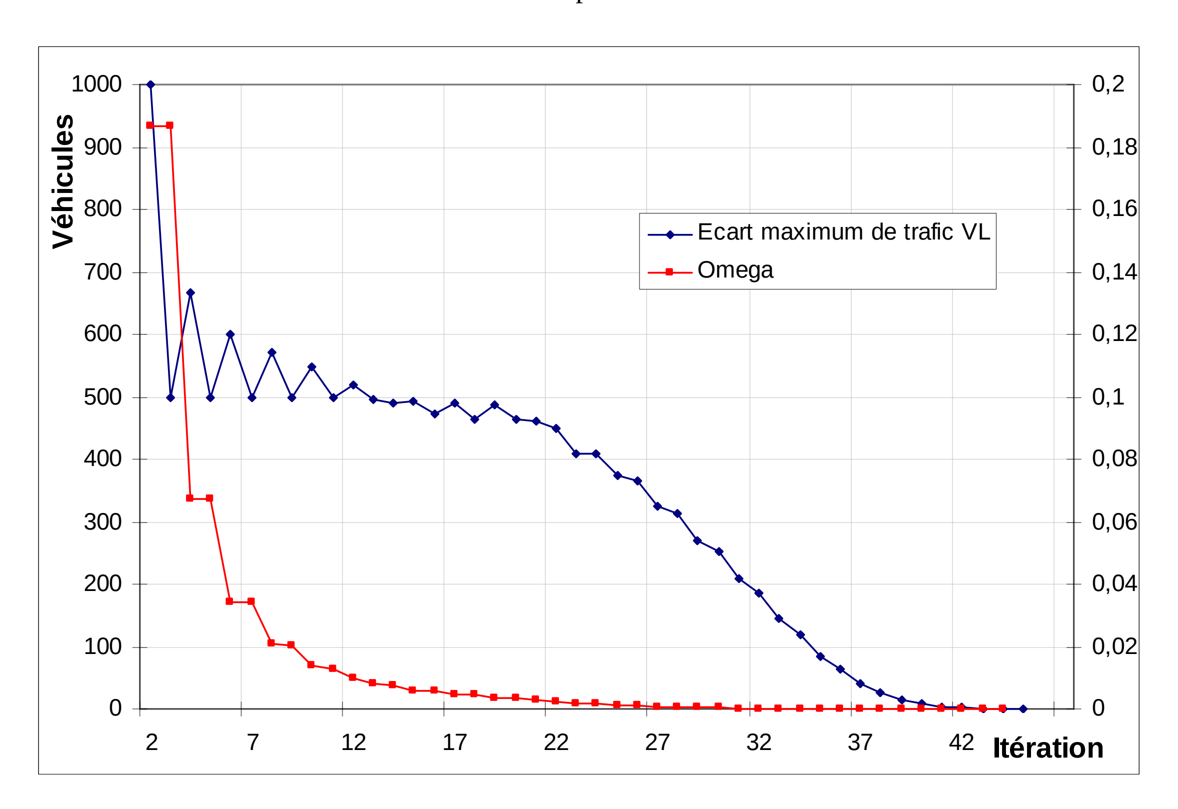
A une itération donnée, le trafic sur l'arc qui apparaît en résultat d'affectation (flux résultat), correspond à la moyenne de toutes les itérations précédentes. Contrairement au flux auxiliaire, on remarque que l'amplitude des oscillations du flux résultat diminue rapidement avec le nombre d'itérations. En d'autres termes, on constate que les trafics modélisés convergent vers une solution stable alors même que l'équilibre (au sens de Wardrop) n'est pas atteint.

Ceci a des conséquences dans le bilan socio-économique sur les résultats du calcul des avantages usagers, car ceux-ci sont basés sur les flux auxiliaires. En effet, les avantages de temps sont calculés par OD afin de pouvoir différencier les valeurs du temps des usagers en fonction de la distance parcourue. Ainsi, le temps de parcours moyen pour une OD est calculé à partir des temps sur les itinéraires empruntés pondérés par leur proportion de trafic respectives. Ces proportions correspondent aux flux auxiliaires que l'on retrouve lors de l'analyse des chemins. Le temps moyen par OD peut donc varier fortement d'une itération à l'autre avec les flux auxiliaires. En revanche, un calcul de l'avantage aux niveaux des arcs utilisant les flux résultats ne permet pas de différencier les valeurs du temps des usagers.

On retient qu'un modèle peut converger de façon suffisante en trafic, mais sans pour autant converger en chemin (ie en flux auxiliaires). Cette notion de convergence en chemin est spécifique à la modélisation interurbaine qui s'intéresse aux chemins empruntés par les usagers. Cependant, cela n'est problématique qu'au niveau du bilan socio-économique, où la chronique des avantages peut connaître de fortes oscillations alors que le modèle converge en trafic. Afin de remédier à ce problème, un calcul aux niveaux des arcs (automatisé à l'aide une macro GISDK) permet de vérifier la convergence des avantages liés aux usagers. De plus, il a été ajouté une option de calcul des moyennes par OD à l'aide d'une MSA, ce qui réduit les problèmes de convergence en chemin.

En fonction de l'objectif du modèle, on pourra se contenter de vérifier la convergence de l'algorithme à l'aide de l'indicateur oméga si l'on s'intéresse seulement aux résultats de trafic. Dans le cas d'un bilan socio-économique, on vérifiera la convergence du modèle également en écart de trafic auxiliaire.

On représente sur le graphe suivant, les indicateurs de convergence donnés par le rapport de convergence, sur deux échelles différentes. Celle de droite correspond à l'indicateur oméga, qui est sans unité, celle de gauche à l'écart entre flux auxiliaire et résultat en véhicules par heure.



Ces deux courbes permettent à la fois de vérifier la convergence des trafics par arc (flux résultats) via l'indicateur Oméga, mais également la convergence en chemin (flux auxiliaire) via l'écart maximum de trafic.

Le même calcul a été réalisé en modifiant les paramètres de la MSA, avec **(K1,K2) = (2,1)** au lieu des paramètres par défaut (1,0). On rappelle (cf. § 05.1 - Principe de calcul de l'équilibre) que ces paramètres déterminent le poids dans la MSA gamma : K1 / (K2 +i). Pour cet exemple, cela rend la convergence encore plus difficile. Les valeurs par défaut sont réputées être optimales dans la plupart des cas. Il est donc recommandé de conserver ces valeurs par défaut.

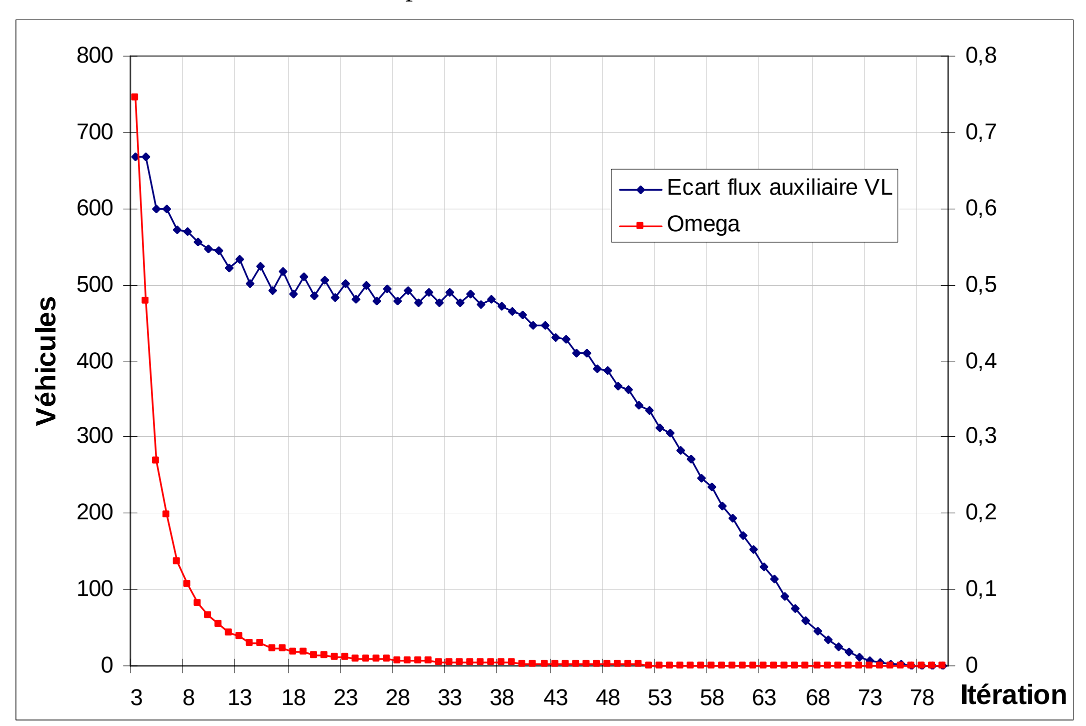


Tableau récapitulatif de la convergence en fonction de l'écart de longueur

Nombre d'itérations pour atteindre le critère de convergence :		Oméga < 0.001	Oméga < 0.00001	Écart entre flux et flux auxiliaire < 1 veh.
Écart de Longueur : (= écart de coût)	10 %	7	8	9
	5 %	11	12	14
	1 %	27	39	43

De façon générale, si l'on regarde les flux de trafic résultant par arc, on s'aperçoit qu'ils convergent rapidement quels que soient les cas. L'erreur relative du trafic par arc est inférieure à 5 % dès la 10ème itération. S'il l'on peut se contenter des résultats de trafic par arc, un nombre d'itérations de l'ordre de 30 est suffisant dans la plupart des cas.

En revanche, si on souhaite exploiter les résultats de trafic en termes de chemins (pour le calcul de bilan) il faudra rapidement augmenter les nombre d'itérations, notamment dans les cas de demandes de trafic élevées.

Plus la différence de coûts entre deux itinéraires est faible, plus l'algorithme prix-temps convergera lentement. Cela peut s'avérer problématique dans certains cas particuliers (par exemple en milieu urbain, caractérisé par un important maillage du réseau). Lors de la vérification de la convergence du modèle, les modélisateurs peuvent être amenés à simplifier les choix d'itinéraire en retravaillant au niveau du réseau afin d'assurer une bonne convergence en chemin du modèle.

8 - Conclusion sur les méthodes d'affectation

8.1 - Source des différences entre les résultats d'affectation des deux logiciels

Bien qu'ayant des formulations différentes, la loi d'affectation Prix-Temps et la loi d'Abraham sont toutes deux basées sur le principe de minimisation des coûts généralisés pour les usagers, et sur le calcul d'un équilibre entre la demande et le niveau de service (les temps de parcours). La loi d'Abraham utilise une valeur du temps fixée et répartit les trafics en fonction du ratio de coût généralisé. La loi prix-temps utilise une distribution continue des valeurs du temps, et répartit les trafics entre itinéraires en fonction des valeurs du temps de coupure, issues des différences des coûts et des temps entre itinéraires. Avec les paramètres par défaut, on observe que l'affectation prix-temps a une plus grande sensibilité aux paramètres du réseau que la loi d'Abraham.

La comparaison des deux lois pour différents cas de concurrence montre des différences d'une bien moindre importance que les effets des paramètres liés aux réseaux, au premier rang desquels les types de routes, ou encore aux valeurs du temps. Les différences s'estompent avec le principe d'équilibrage et la croissance de la demande de trafic. On peut retenir que les écarts en répartition du trafic sont les plus importants pour les cas de routes concurrentes proches en coûts.

Les courbes temps-débit ont fortement été modifiées entre Ariane et les modules Sétra de TransCAD. Les différences entre ces courbes sont au moins du même ordre de grandeur que les différences entre les types de routes. Les paramètres actuels des courbes BPR (ceux de la table Setra_VDF d'octobre 2010) donnent des courbes de temps nettement moins pénalisantes que les courbes Ariane.

Il faut noter cependant qu'en interurbain, les charges de trafic ne sont souvent pas suffisantes pour modifier significativement les temps de parcours. C'est donc le paramétrage des temps à vide, au plus proche des observations, qui est important. Par ailleurs, lorsque la charge de trafic est importante, il devient alors nécessaire de calibrer les facteurs de concentration.

A partir de ces éléments, on peut conclure qu'il n'y a pas de biais systématique entre les résultats en répartition de trafic obtenus avec Ariane et les modules Sétra de TransCAD. Si l'on tente d'expliquer les différences de résultats entre deux études de trafic, les raisons sont plus à chercher dans le paramétrage des réseaux, en particulier les types de routes et les temps à vide, que dans les lois d'affectations.

Enfin, notons que les écarts en termes d'avantages calculés entre situations de projet et de référence trouvent leurs explications dans les répartitions de trafics mais surtout dans les temps de parcours entre les deux situations. Pour les cas simples de concurrence entre deux routes étudiées, on trouve notamment des avantages de temps plus importants avec Ariane. Cela est dû au fait que les courbes temps-débit Ariane sont globalement plus pénalisantes, et les temps de parcours en situation de référence sont ainsi beaucoup plus élevés, impliquant un gain de temps plus important.

De façon générale, les différences entre les deux lois d'affectation ont un impact minime dans les résultats de modèles par rapport à l'importance du calage des paramètres pour reproduire correctement les choix d'itinéraires. Au lieu d'attacher de l'importance à la loi d'affectation, il est plus judicieux d'examiner finement les méthodes de calage et de validation des modèles.

8.2 - Recommandations pour l'affectation avec les modules Sétra

Pour pouvoir critiquer les résultats obtenus avec les modules Sétra, il est important de bien comprendre les principes de l'affectation prix-temps implémentée, notamment la représentation des itinéraires sur le graphe prix-temps qui permet d'expliquer à la fois la sélection des itinéraires efficaces ainsi que les proportions de trafic qui leur sont attribuées.

Le travail des modélisateurs a été grandement amélioré avec la sélection automatique des itinéraires, mais ceux-ci doivent en contre partie vérifier la vraisemblance des itinéraires sélectionnés. Ce travail doit s'intégrer au calage du modèle, étape garante d'une réelle qualité du modèle, avec la vérification (par ordre d'importance) :

- du codage des types de routes ;
- des temps de parcours (en fait leur calibrage quand des données sont disponibles) ;
- des proportions affectées entre les itinéraires empruntés ;
- des volumes aux points de comptages.

Pour cela, les modélisateurs doivent notamment modifier les valeurs du temps et les coûts de circulation via le malus d'inconfort, afin que le modèle reconstitue les observations (en particulier les répartitions de trafics) et afin que celui-ci converge correctement. Pour cela, on s'assurera que le modèle ne comporte pas de couples d'itinéraires concurrents trop proches en coût (avec une différence par exemple inférieure à 0.50 €).

A noter que sont en cours des travaux complémentaires dont l'objectif est de produire un guide sur le calage et la validation des modèles d'affectation du trafic.

Chapitre IV
Des évolutions dans les méthodes de bilan socio-économique

1 - Historique des textes réglementaires

Le cadre des études d'évaluation socio-économique des projets routiers en rase campagne est défini dans des instructions du ministère chargé des transports depuis 1963. Il a évolué de cette date à nos jours accompagnant les politiques de choix des projets.

Cinq instructions se sont ainsi succédées depuis 1980 :

- l'instruction sur les méthodes d'évaluation des effets économiques des investissements routiers en rase campagne de mars 1980 (Direction des Routes) ;
- l'instruction relative aux méthodes d'évaluation des investissements routiers en rase campagne de 1986 (Direction des Routes) ;
- la circulaire du 3 octobre 1995 relative à l'harmonisation des méthodes d'évaluation des grands projets d'infrastructures et son instruction cadre (ministère chargé des transports) ;
- **l'instruction et la circulaire n°98-99 du 20 octobre 1998** [11] relatives aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers en rase campagne (Direction des Routes), qu'on appellera "**instruction de 1998**" dans cette partie ;
- **l'instruction cadre du 25 mars 2004** relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport (Comité des Directeurs Transport), son complément du 27 mai 2005 [12] et **sa déclinaison routière provisoire de mai 2007** [13]. On désignera l'ensemble de ces ouvrages sous le terme "**instruction de 2004**".

Chacune de ces instructions précise les règles à respecter pour la conduite du calcul socio-économique : la monétarisation des différents avantages, les durées de calcul, le taux d'actualisation, … ainsi que les indicateurs à utiliser pour caractériser les projets (dont les grands principes sont présentés au chapitre II - 4.3 - Bilan socio-économique).

Le module de calcul socio-économique du logiciel de modélisation Ariane 06 utilisait la méthodologie préconisée dans l'instruction de 1998. En 2006 une version du logiciel nommée Ariane 07 permettait d'intégrer les préconisations de l'instruction de 2004. Les modules Sétra de TransCAD, quant à eux, effectuent un calcul socio-économique conformément aux préconisations de l'instruction de 2007.

Le passage de Ariane 06 à Ariane 07 ou TransCAD pour les études d'évaluation de projet inclut ainsi une évolution dans les méthodes de calcul socio-économique. Cette évolution a engendré des écarts entre les rentabilités calculées avec les différents logiciels, et ce toutes choses égales par ailleurs, indépendamment des chiffres de trafic. Pour mieux comprendre les impacts du passage d'Ariane 06 à Ariane 07 ou TransCAD dans l'évaluation des projets, il semble donc indispensable de pouvoir analyser l'effet particulier de l'évolution des méthodes d'évaluation socio-économique. L'objet de ce chapitre est ainsi de mesurer l'importance des écarts de rentabilité uniquement liés aux méthodes du calcul socio-économique et d'en détailler les origines. Il s'appuie pour cela sur l'analyse théorique des formules du bilan socio-économique, ainsi que sur sa mise en œuvre sur un exemple, la déviation de Léguevin, détaillée en partie 4.

2 - De l'instruction de 1998 à celle de 2004 : principales évolutions

Entre l'instruction de 1998 et celle de 2004, de premières évolutions sont observées sur la définition même de la notion de rentabilité.

Dans l'instruction de 1998, il est recommandé d'évaluer les projets sur le critère du bénéfice actualisé et de la date optimale de mise en service. On calcule le taux de rentabilité interne qui caractérise l'opportunité du projet, et le bénéfice actualisé par euro investi qui tient compte de la contrainte de financement. Le taux d'actualisation retenu, 8 %, inclut implicitement une prise en compte du risque projet et du risque pour les fonds publics (cf. § 3.1). Le projet le plus opportun est celui qui, placé à sa date optimale de mise en service, a le bénéfice par euro investi le plus élevé. Les avantages pris en compte sont le temps, la consommation de carburant, l'entretien et l'usure du véhicule, les péages (en tant que transferts), la sécurité et le malus d'inconfort. Un calcul des coûts liés à la pollution de l'air, le bruit et l'effet de serre est recommandé, mais il ne doit pas être intégré dans le bénéfice actualisé.

L'instruction de 2004 reprend les principes de 1998, mais intègre cette fois la prise en compte des effets sur l'environnement (pollution de l'air et effet de serre) dans le calcul du bénéfice actualisé. Le taux d'actualisation varie dans le temps de 4 % à 2 % et n'inclut pas de prise en compte du risque (cf. § 3.1). Ce dernier doit donc être appréhendé à part dans les études de rentabilité. Un coût d'opportunité des fonds publics de 30 % doit être pris en compte dans l'analyse de la rentabilité. Pour les projets concédés, en plus du bénéfice actualisé par euro investi, on calcule le bénéfice actualisé par euro public dépensé qui permet de prendre en compte la contrainte budgétaire de l'Etat.

D'autres paramètres portant plus spécifiquement sur le calcul tels que les durées de calcul et la monétarisation des différents avantages ont également évolué entre ces différentes instructions comme récapitulé dans le Tableau 1. Certains de ces avantages sont marchands, c'est-à-dire qu'ils s'achètent et se vendent sur un marché, leurs valeurs sont alors directement issues de l'observation des prix sur le marché. Leur revalorisation signifie que leurs prix ont évolué entre 1998 et 2004 de manière plus forte ou plus faible que l'évolution globale des prix de la Consommation Finale des Ménages par tête (CFM). D'autres avantages sont non marchands et leur valeur est alors fixée de façon normative par des circulaires du ministère chargé des transports.

Évolution entre les instructions	Instruction 1998	Instruction 2004	Sources
	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2000	
Durée des calculs	30 ans avec valeur résiduelle	50 ans sans valeur résiduelle	Instructions de 1998 et instructions de 2004
Taux d'actualisation	8%	4% à 2%	Commissariat Général du Plan
Usure, entretien du véhicule (€/km)	entretien+dépréciation	entretien+dépréciation	
VL (TTC)	0,09	0,10	Prix observés Source : Auto Journal
PL (HTVA)	0,14	0,13	Prix observés, Source : Comité National Routier
Carburant (€/L)			Prix observés, source : ministère chargé de l'économie
VL (TTC)	0,85	1,00	
PL (HTVA)	0,56	0,71	
Taxes sur les carburants (€/L)			Prix observés, source : ministère chargé de l'économie
VL	0,65	0,66	
PL	0,36	0,39	

Temps (€/h)			Valeurs normatives, source : rapports Boiteux I et II
VL	14	de 9,88 à 34,36	
PL	32	38	
Accident			Valeurs normatives, source : rapports Boiteux I et II
1 tué	691 174 €	1 000 000 €	
1 blessé grave	71 172 €	150 000 €	
1 blessé léger	15 131 €	20 000 €	
dégâts matériels	3 848 €	3 400 €	
Péages (€/km)			Prix observés, source : ASFA et DGR
VL	0,06	0,066	
PL	0,12	0,149	
Malus d'inconfort (€/km)			Résultats de modélisation avec ARIANE
chaussée unique	0,026	0,025	
carrefours non dénivelés	0,017	0,016	
caractère non autoroutier	0,007	0,007	
accès non limité	0,007	0,007	

Tableau 1 : tableau récapitulatif des valeurs tutélaires, hors coûts environnementaux, des instructions de 1998 et 2004

Note : la clef de passage utilisée pour passer des francs 1994 aux euros 2000 est la même pour tous les exemples : en plus du taux de change 6.55957, on utilise l'évolution du TP01 (soit un facteur de 1.082) pour les coûts de construction et de grosses réparations et de l'évolution des prix de la consommation finale des ménages (soit un facteur de 1.167) pour tous les autres paramètres.

Certains des avantages ont des valeurs qui évoluent dans le temps, il s'agit du temps, du malus d'inconfort et de l'insécurité. Leur croissance dépend en général des hypothèses d'évolution du contexte macro-économique et notamment de la Consommation Finale des Ménages (CFM) par tête ou du Produit Intérieur Brut (PIB). De l'instruction de 1998 à celle de 2004, ces hypothèses d'évolution du contexte macro-économique ont été ajustées et de nouvelles règles d'évolution du paramètre valeur du temps des PL ont été définies (Tableau 2). Dans la suite du chapitre, on étudiera à l'année 2000 et à l'année 2050 les valeurs des paramètres dont les règles d'évolution changent afin de tenir compte de ce phénomène dans les comparaisons.

Évolution des valeurs tutélaires	Instruction 1998	Instruction 2004	Sources
Temps VL	comme la CFM par tête	comme 0,7 fois la CFM par tête	Valeurs normatives Source : rapports Boiteux I et II
Temps PL	pas de croissance	la valeur du temps des chargeurs de 6,75 € augmente comme les 2/3 du PIB, le reste est constant.	
Accident	comme la CFM		
Malus inconfort	comme la CFM par tête	comme 0,7 fois la CFM par tête	

Tableau 2 : tableau récapitulatif des croissances des valeurs tutélaires des instructions de 1998 et 2004

Dans chacune des instructions, il existe plusieurs scénarii de croissance. Nous comparons ici les hypothèses moyennes du scénario central entre les deux instructions :

Évolution des valeurs tutélaires	Instruction 1998	Instruction 2004
Hypothèse moyenne de croissance de la CFM	Jusqu'en 2025 : 2,1% Au-delà de 2025 : 0%	Jusqu'en 2025 : 1,4% De 2025 à 2050 : 1,3% Au-delà de 2025 : 0%
Hypothèse moyenne de croissance du PIB	Jusqu'en 2025 : 2,4% Au-delà de 2025 : 0%	Jusqu'en 2025 : 1,9% De 2025 à 2050 : 1,5% Au-delà de 2025 : 0%

Avec ces coefficients géométriques annuels, on obtient les facteurs multiplicatifs suivants par rapport à l'année 2000 :

Coefficients multiplicateurs par rapport à l'année de référence 2000		Instruction 1998	Instruction 2004	Écart relatif
PIB	2009	1,24	1,18	-5%
	2025	1,81	1,60	-12%
	2050	1,81	2,32	28%
CFM par tête	2009	1,21	1,13	-7%
	2025	1,68	1,42	-15%
	2050	1,68	1,96	17%

Pour les valeurs tutélaires, on obtient les facteurs multiplicatifs suivants par rapport à l'année 2000 :

Évolution des valeurs tutélaires (Coefficients multiplicateurs par rapport à l'année de référence 2000)		Instruction 1998	Instruction 2004	Écart relatif
Valeur du temps PL	2009	32 €	1,12 * 6,75 + 31,4 = 39,0 €	22%
	2025	32 €	1,37 * 6,75 + 31,4 = 40,6 €	27%
	2050	32 €	1,76 * 6,75+ 31,4 = 43,3 €	35%
Coefficient multiplicatif des valeurs du temps VL et malus	2009	1,21	1,09	-10%
	2025	1,68	1,28	-24%
	2050	1,68	1,60	-5%

Tableau 3 : tableau récapitulatif des coefficients de croissance des valeurs entre les instructions de 1998 et 2004

Les avantages liés au temps VL et PL étant proportionnels aux valeurs du temps, ceux liés aux PL peuvent augmenter ainsi de plus de 20% entre les deux instructions. La croissance moindre de la valeur du temps VL doit être relativisée selon les classes de distances définies dans l'instruction provisoire de 2007. Les analyses plus poussées se trouvent dans le paragraphe 0 3.3.3 - Des écarts de valeur du temps très variables.

En effet, pour comprendre l'effet de chacune des évolutions intervenues entre l'instruction de 1998 et celle de 2004 sur la rentabilité des projets, il faut procéder par étape. Dans un premier temps, en section 3, chaque évolution sera analysée seule indépendamment des autres, puis en section 4 on analysera les effets de la combinaison de toutes les évolutions en comparant, sur un exemple simple, un calcul de rentabilité réalisé à l'aide de l'instruction de 1998 puis de celle de 2004.

3 - Influence des différentes évolutions entre les instructions de 1998 et 2004

Dans toute cette partie on appellera "écart entre les instructions" la différence entre les valeurs tutélaires des instructions 2004 et 1998 rapportée à la valeur absolue de la valeur de l'instruction 1998.

$$écart\% = \frac{(valeur_instruction_2004 - valeur_instruction_1998)}{|\ valeur_instruction_1998\ |}$$

Dans les bilans socio-économiques, on travaille en avantage relatif : un avantage négatif représente un coût pour la collectivité et un avantage positif un gain. Une attention particulière est nécessaire à la lecture de l'écart relatif, suivant qu'il s'agit d'un coût ou d'un gain. Par exemple, une diminution d'un coût donnera un écart positif.

3.1 Le taux d'actualisation

3.1.1 - Principes

L'actualisation est l'opération mathématique qui permet de comparer entre elles des valeurs économiques qui s'échelonnent dans le temps : il s'agit de ramener la valeur future d'un bien ou d'une dépense à une valeur actuelle.

La notion d’actualisation est distincte des notions d’inflation, d'indexation qui consistent à transformer des euros d’une année donnée en euros d’une autre année en utilisant de manière ascendante ou descendante un index (exemple index TP01) et distincte également du taux d'intérêt bancaire.

Elle représente la plus ou moins grande préférence que l’on a pour le présent par rapport au futur.

Le taux d’actualisation renvoie ainsi au prix que les agents ou collectivités accordent au temps : préfère-t-on avoir "un plaisir immédiat" ou "un plaisir dans le futur" ?

Pour essayer de répondre à cette question, il faut comparer des sommes d’argent à des périodes différentes.

Exemple 1 : "En supposant qu'il n'y a pas d'inflation, préférez-vous avoir 15 € maintenant ou dans 5 ans ?"

- avec un taux d’actualisation de 4 %, 15 € aujourd'hui correspondent à 22,2 € dans 5 ans.
- avec un taux de 8 %, 15 € aujourd'hui correspondent à 32,4 € dans 5 ans.

Exemple 2 : "En supposant qu'il n'y a pas d'inflation, préférez-vous avoir 15 € maintenant ou dans 30 ans ?"

- avec un taux d’actualisation de 4 %, 15 € aujourd'hui correspondent à 48 € dans 30 ans.
- avec un taux de 8 %, 15 € aujourd'hui correspondent à 150 € dans 30 ans.
- avec un taux de 3,5 %, 15 € aujourd'hui correspondent à 42 € dans 30 ans.

D'importants travaux interministériels sur le taux d'actualisation ont fait l'objet de plusieurs rapports du Commissariat Général du Plan, notamment « Transports : choix des investissements et coût des nuisances » de juin 2001 dit rapport « Boiteux II» [14] et « Révision du taux d’actualisation des investissements publics » de janvier 2005 dit rapport « Lebègue » [15]. Ces travaux ont amené à la mise à jour du 27 mai 2005 de l'instruction de 2004, avec une révision du taux d’actualisation fixé dorénavant à 4 % pour la période 2005-2035, décroissant par palier ensuite selon les recommandations du rapport Lebègue.

En pratique, le taux d'actualisation peut être fixé en référence à trois grandeurs : le Taux Social de Préférence pour le Présent (TSPP), le rendement marginal net du capital privé, et les taux d'intérêt à long terme. Dans une économie idéale sans distorsions ni incertitudes, avec un marché parfait des capitaux, ces trois grandeurs sont égales. On expliquera ici uniquement le choix du rendement marginal net du capital privé et du TSPP utilisés respectivement dans les instructions de 1998 et 2004.

- Le rendement marginal net du capital privé : il s'agit d'une approche fondée sur l'observation. On peut considérer que la réalisation de projets publics comme les infrastructures de transport mobilise des facteurs de production qui auraient pu être utilisés à des fins privées s'il n'y avait pas eu le projet. Le taux d'actualisation des projets publics ne doit donc pas favoriser des projets moins rentables que ceux qui auraient pu être effectués dans le privé. Cette règle amène à retenir un taux qui soit équivalent au taux de rendement interne des capitaux privés. C'est ce qui a été effectué pour fixer le taux d'actualisation retenu dans l'instruction de 1998. Le taux de 8 % est basé sur l'observation du taux de rentabilité interne des capitaux privés du secteur de l'industrie qui s'élevait à 6 % au début des années 80 auquel on a ajouté 2 % de prime de risque pour tenir compte de l'incertitude sur l'environnement international.
- Le Taux Social de Préférence pour le Présent : il s'agit d'une approche normative fondée sur la théorie micro-économique de la préférence des consommateurs. Le TSPP est divisé en deux composantes, un taux de préférence pure pour le présent et un effet richesse. Il n'inclut pas de prise en compte des risques qui doivent être estimés à part. Le taux de préférence pure pour le présent traduit l'impatience pure à posséder un bien. L'effet richesse correspond aux effets d'anticipation par les ménages de la croissance et donc de leur richesse future. Ainsi, dans un contexte de richesse croissante des ménages, si l’on dispose d’un euro supplémentaire, autant le dépenser quand son effet sur l’utilité est le plus élevé, c’est-à-dire quand nous sommes les moins riches. On peut également illustrer l'effet richesse par le raisonnement suivant extrait du rapport du Commissariat Général du Plan : "l’effet richesse implique que la valeur d’un bien aujourd’hui est supérieure à la valeur qu’il aura pour les générations futures grâce au progrès technique. L’utilité que la génération future retirera de la consommation de ce bien risque donc de ne pas compenser la perte subie par la génération actuelle. En clair, pourquoi faudrait-il se priver aujourd’hui de l’essentiel qui deviendra l’accessoire demain ?". L'effet richesse est fonction de l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation et de la croissance de la consommation. Pour tenir compte des incertitudes sur la consommation, cet effet varie dans le temps. En 2004, le Commissariat Général du Plan a retenu la méthode du TSPP pour estimer le taux d'actualisation. Il a estimé le taux de préférence pure pour le présent à environ 1 %, l'effet richesse à environ 3 % et en a déduit, au vu des incertitudes sur la valeur de l'effet richesse, un taux d'actualisation de 4 % décroissant dans le temps pour atteindre 3 % à l'horizon de100 ans, et 2% à l'horizon de500 ans.

Les évolutions intervenues entre 1998 et 2004 dans le choix de la méthode de calcul et dans la valeur du taux sont issues de deux constats :

- la transformation du rôle de l'État qui s'engage de moins en moins dans la production au profit de la régulation : les risques d'éviction des projets privés par les fonds publics diminuent et le choix d'un taux proche des rendements marginaux des capitaux privés perd de sa pertinence ;
- un intérêt croissant pour le développement durable et les effets de très long terme qui conduit à diminuer la préférence pure pour le présent et donc le taux d'actualisation. Pour mieux comprendre les effets de l'actualisation sur la valeur d'un avantage futur on peut calculer la valeur de 1 million aujourd'hui, dans 30 ans, dans 100 ans et dans 200 ans avec divers taux :

	Valeur actualisée d'1 million d'euros valeur 2000 aux dates suivantes		
	30 ans	100 ans	200 ans
Taux d'actualisation de 2 %	552 000	138 000	19 000
Taux d'actualisation de 4 % jusqu'en 2035, 3,5% de 2035 à 2055 et 3 % ensuite	308 000	35 345	1 839
Taux d'actualisation de 4 % constant	308 000	20 000	400
Taux d'actualisation de 8 %	99 000	400	0.02

Tableau 4 : effets du taux d'actualisation sur la valeur d'un bien futur

On remarque que plus le taux d'actualisation est élevé moins les gains futurs ont de la valeur. Le taux à 8 % écrase tous les gains après 30 ans alors qu'un taux d'actualisation à 4 % variable permet de valoriser le très long terme.

3.1.2 - Impact sur la rentabilité des projets

Le passage d'un taux d'actualisation fixe de 8 % à un taux d'actualisation variable dans le temps de 4 % à 3 % a un impact fort sur les chiffres de bénéfice actualisé. La portée de cet impact dépend de la durée de vie du projet, du temps des travaux et de la chronique des gains et des coûts.

Le Tableau 5 regroupe les résultats d'une simulation faite avec un projet qui coûterait 1 000 € aujourd'hui et qui rapporterait 200 € par an ensuite avec un coût de 100 €. Différents tests sont effectués avec des taux d'actualisation de 4 % variable et 8 % et deux règles de croissance de la valeur des coûts (les gains de 200 € sont considérés constants).

Bénéfice actualisé en 2008 d'un projet qui coûterait 1 000 € (valeur 2000) en 2008 puis rapporterait 200 € par an et coûterait 100 € (valeur 2000) à partir de 2009 (valeur 2000) sur les durées de calcul suivantes			
Durée du calcul	30 ans	50 ans	100 ans
Taux d'actualisation variant de 4 % à 3 %, pas de croissance des coûts	729 €	1 167 €	1 569 €
Taux d'actualisation de 8 % pas de croissance des coûts	125 €	223 €	249 €
Taux d'actualisation variant de 4 % à 3 %, croissance des coûts de 3 %	- 58 €	- 563 €	- 3 063 €
Taux d'actualisation de 8 %, croissance des coûts de 3 %	- 266 €	- 366 €	- 483 €

Tableau 5 : effets du taux d'actualisation sur le bénéfice actualisé d'un projet

Sans croissance des coûts, le bénéfice actualisé est de 5 à 6 fois supérieur avec un taux de 4 % variable par rapport à un taux de 8 %, parce qu'avec un taux de 4 % le gain de 100 € constants reste significatif sur une plus longue durée.

Lorsqu'on introduit une croissance des coûts, on constate qu'à moyen terme le bénéfice actualisé avec un taux de 4 % reste supérieur au bénéfice actualisé avec un taux de 8 % mais qu'à plus long terme, la hiérarchie s'inverse. En effet, le taux à 4 % écrase moins les coûts de long terme et permet de mieux valoriser les préjudices laissés aux générations futures dans la rentabilité d'un projet.

Pour la déviation de Léguevin décrite en 04 - La déviation de Léguevin, un projet analysé selon les deux méthodes, le passage d'un taux d'actualisation de 8 % à 4 % multiplie par trois le bénéfice actualisé.

Globalement, la diminution du taux d'actualisation conduit donc à mieux valoriser les gains et les coûts à venir. Si la chronique des avantages est croissante dans le temps et positive, le passage d'un taux de 8 % à 4 % impliquera une augmentation importante du bénéfice actualisé. Si au contraire, les coûts prennent le pas sur les gains sur le long terme et que la chronique des avantages décroît puis devient négative, le bénéfice actualisé à 4 % sera plus défavorable qu'un bénéfice actualisé à 8 % (à condition que les calculs soient conduits sur une

longue période). Compte tenu des règles de calculs définies dans l'instruction de 2004 et des projets routiers actuellement analysés, c'est le premier cas qui est systématiquement observé aujourd'hui. Cet état de fait pourrait changer avec les nouvelles valorisations des effets sur l'environnement prévues à l'issue du Grenelle.

3.2 - La durée des calculs

3.2.1 - Principes

L'instruction de 1998 préconise de conduire les calculs des coûts et des avantages des projets à l'infini. On fait alors l'hypothèse que l'utilité du projet n'est pas remise en cause par les générations futures, qui ne décideront donc pas de le détruire ou d'en changer l'usage et qu'il n'y a pas de coût de régénération ou de mise en état de la friche à prévoir. En pratique, les hypothèses macro-économiques prises dans l'instruction de 1998 font que les gains et les coûts des projets sont constants à partir d'une année horizon n. Le calcul à l'infini revient alors à conduire les calculs jusqu'à l'année n, puis à ajouter une valeur résiduelle égale à l'actualisation à l'infini de l'avantage de l'année n. Pour fixer les choses, l'instruction de 1998 recommande d'arrêter les calculs à la 30ème année après la mise en service, puis d'ajouter la valeur résiduelle correspondante (cf. formule ci-dessous).

$$VR = \sum_{n=30}^{\infty} \frac{avantage_{30}}{(1+a)^n} = \frac{avantage_{30}}{(1+a)^{30}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1+a)^n} = \frac{avantage_{30}}{a \times (1+a)^{29}}$$

avec VR : valeur résiduelle

avantage30 : l'avantage de la 30ème année de vie du projet

a : taux d'actualisation.

L'instruction de 2004 préconise quant à elle, de conduire les calculs sur 50 ans après la mise en service sans valeur résiduelle. On fait ainsi l'hypothèse que 50 ans après sa mise en service, une infrastructure ne présente plus de gains ni de coûts pour la collectivité. L'extension des calculs à 50 ans est cohérente avec le passage du taux d'actualisation à 4 % et vise à mieux prendre en compte les effets de long terme. L'arrêt des calculs après 50 ans répond aux préoccupations actuelles de développement durable : on ne spécule plus sur l'utilité à l'infini d'un aménagement pour les générations futures et on considère que les incertitudes sur l'usage futur de l'infrastructure sont trop importantes pour estimer sa valeur à cette échéance. A noter d'ailleurs que la convergence de la série à l'infini des avantages actualisés n'est plus assurée : en effet dans l'instruction de 2004 on adopte un système de prix relatif pour les biens environnementaux qui intègre les effets de long terme, avec notamment une valeur de l'effet de serre qui croît de 3 % par an alors que le taux d'actualisation décroît de 4 % à 3 % à l'horizon de100 ans et à 2 % à l'horizon de500 ans.

3.2.2 - Impact sur la rentabilité des projets

L'effet de la durée des calculs retenue sur la rentabilité globale dépendra fortement de la chronique des avantages et du taux d'actualisation.

On aura égalité entre les deux calculs si l'augmentation des avantages entre 30 ans et 50 ans après la mise en service est forte, sinon le bénéfice actualisé calculé sur 50 ans sera plus faible que celui calculé sur 30 ans avec valeur résiduelle.

$$\sum_{n=31}^{50} \frac{avantage_n}{(1+a)^n} = \sum_{n=30}^{\infty} \frac{avantage_{30}}{(1+a)^n} \quad \text{soit} \quad \sum_{n=31}^{50} \frac{avantage_{30} - avantage_n}{(1+a)^n} + \sum_{n=50}^{\infty} \frac{avantage_{30}}{(1+a)^n} = 0$$

Le Tableau 6 regroupe les résultats d'une simulation faite avec un projet qui coûterait 1 000 € aujourd'hui et qui rapporterait 200 € par an ensuite avec un coût de 100 €. Différents tests sont effectués avec des taux d'actualisation de 4 % et 8 %, deux règles de croissance des coûts et des gains et des durées de calcul de respectivement 30 ans avec valeur résiduelle et 50 ans sans valeur résiduelle.

Bénéfice actualisé en 2008 d'un projet qui coûterait 1 000 € (valeur 2000) en 2008 puis rapporterait 200 € (valeur 2000) par an et coûterait 100 € (valeur 2000) de préjudices à l'environnement à partir de 2009 sur les durées de calcul suivantes	30 ans avec valeur résiduelle (1)	50 ans sans valeur résiduelle (2)	Écart relatif ((1)-(2))|/|(2)|
Taux d'actualisation de 4 % constant pas de croissance des coûts ni des gains	1 530 €	1 148 €	33%
Taux d'actualisation de 8 % pas de croissance des coûts ni des gains	260 €	223 €	17%
Taux d'actualisation de 8 %, croissance des coûts de 3 %	- 314 €	- 366 €	14%
Taux d'actualisation de 8 %, croissance des gains de 4 %	1 965 €	2 019 €	-3%

Tableau 6 : effets de la durée des calculs sur le bénéfice actualisé d'un projet

A avantages constants, selon le taux d'actualisation retenu, le bénéfice actualisé est de 1,1 à 1,3 fois supérieur avec un calcul sur 30 ans plus valeur résiduelle qu'avec un calcul sur 50 ans sans valeur résiduelle. Cette règle reste valable pour une faible croissance ou décroissance des avantages (dans notre exemple pour des croissances des coûts et des gains ne dépassant pas respectivement 3 % et 4 % par an).

Si on introduit une croissance des coûts de 3 %, le bénéfice actualisé sur 30 ans avec valeur résiduelle est inférieur en valeur absolue au bénéfice actualisé calculé sur 50 ans : l'arrêt des calculs à 30 ans avec valeur résiduelle ne permet pas de valoriser l'ensemble des coûts du projet lorsque les avantages décroissent.

Si on introduit une croissance des gains de 4 %, le bénéfice actualisé sur 30 ans avec valeur résiduelle est inférieur au bénéfice actualisé calculé sur 50 ans : l'arrêt des calculs à 30 ans avec valeur résiduelle ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des gains du projet lorsque les avantages sont fortement croissants.

Dans le test développé pour la déviation de Léguevin en 04 - La déviation de Léguevin, un projet analysé selon les deux méthodes, le fait de calculer la rentabilité selon les critères de l'instruction de 1998 sur 50 ans sans valeur résiduelle au lieu de 30 ans avec valeur résiduelle diminue le bénéfice actualisé de 11% (cf. **Tableau 18** et **Tableau 19**).

Finalement, une durée de calcul sur 30 ans avec une valeur résiduelle calculée comme la somme des avantages à l'infini est une bonne approximation des bénéfices lorsque ceux-ci restent stables à long terme. Elle n'est plus pertinente lorsque les avantages sont fortement croissants ou décroissants dans le temps. Le passage de la durée de calcul de 30 ans avec valeur résiduelle à 50 ans conduit à ne plus spéculer sur des gains lointains et à mieux prendre en compte les éventuels coûts de moyens termes (entre 30 et 50 ans). Pour les projets routiers actuellement analysés, dont les avantages sont quasiment stables sur le long terme, le changement de durée de calcul induit mécaniquement une baisse du bénéfice actualisé. Cette baisse est toutefois modérée dans le calcul global du bénéfice actualisé au regard de l'effet du taux d'actualisation étudié en 2.

3.3 - Les valeurs tutélaires pour l'avantage des usagers

Cette partie analyse une à une les évolutions des valeurs tutélaires entre 1998 et 2004.

3.3.1 - L'entretien et la dépréciation des véhicules stables de 1998 à 2004

L'entretien et la dépréciation[1] des véhicules sont globalement valorisés de la même façon dans l'instruction de 1998 et l'instruction de 2004. Ceci traduit la relative stabilité de ces coûts pour les usagers entre les deux périodes.

Toutes choses égales par ailleurs, les avantages d'entretien et de dépréciation évalués avec l'instruction de 1998 ou l'instruction de 2004 restent donc relativement proches.

Usure, entretien et dépréciation des véhicules [Unité de référence véhicule.km]	Instruction 1998	Instruction 2004	Écart relatif
	Valeur en euros 2000 quelle que soit l'année	Valeur euros 2000 quelle que soit l'année	
VL	0,09 €	0,10 €	3%
PL	0,14 €	0,13 €	-7%

Tableau 7 : l'entretien et la dépréciation des véhicules dans les instructions de 1998 et de 2004

Dans l'exemple de la déviation de Léguevin (cf. **Tableau 17**), la somme actualisée des coûts d'entretien et d'exploitation des véhicules augmente de 2 % avec l'instruction de 2004 par rapport à celle de 1998 (hors effet du taux d'actualisation et de la durée des calculs).

3.3.2 - Un malus d'inconfort plus faible dans l'instruction de 2004

Le malus d'inconfort est défini par type de route, comme l'addition de différentes composantes relatives au confort de conduite. Les écarts de valorisation entre les deux instructions peuvent être liés à la valeur même du paramètre mais aussi à sa règle d'évolution dans le temps. En effet, les écarts entre instructions diffèrent avec le temps variant pour tous les types d'inconfort de - 5 % en 2000 à - 10 % en 2050, avec un écart maximum en 2025 à – 29 % (cf. Tableau 8). La valeur du malus en 2000 est proche dans les deux instructions. En revanche, la règle de croissance de la valeur est plus faible avec l'instruction de 2004 qu'avec celle de 1998 (voir les coefficient de croissance au § 2 dans le Tableau 3). La valeur du malus sur le long terme avec l'instruction de 2004 est donc inférieure à celle de l'instruction de 1998.

Ainsi la valeur du malus n'a quasiment pas été modifiée entre les deux instructions, ce sont les hypothèses de croissance macro-économique ainsi que l'élasticité de la valeur à ces hypothèses qui ont été revues à la baisse. Au final, l'avantage actualisé total de malus d'inconfort est plus faible avec l'instruction de 2004. L'écart précisément engendré sur la rentabilité globale du projet dépend des types de routes présents dans la zone d'influence du projet.

[1] La dépréciation des PL est en fait prise en compte dans la valeur du temps.

		Instruction 1998	Instruction 2004	Instruction 1998	Instruction 2004			
	Unité de référence	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2050	Valeur en euros 2000 année 2050	Ecart année 2000	Ecart année 2025	Ecart année 2050
Croissance de la valeur du temps VL et du malus		2,1 % jusqu'en 2025, 0 % ensuite	1 % jusqu'en 2025, 0,9 % de 2025 à 2050, 0 % ensuite	2,1 % jusqu'en 2025, 0 % ensuite	1 % jusqu'en 2025, 0,9 % de 2025 à 2050, 0 % ensuite			
Malus d'inconfort	Véhicule/km							
chaussée unique		0,026 €	0,025 €	0,044 €	0,040 €	- 4 %	-27 %	- 9 %
carrefours non dénivelés		0,017 €	0,016 €	0,028 €	0,026 €	- 5 %	-28 %	- 9 %
caractère non autoroutier		0,007 €	0,007 €	0,013 €	0,011 €	- 6 %	-29 %	- 11 %
accès non limité		0,007 €	0,007 €	0,013 €	0,011 €	- 6 %	-29 %	- 11 %

Tableau 8 : le malus d'inconfort dans les instructions de 1998 et 2004

Dans l'exemple de la déviation de Léguevin (cf. **Tableau 17**), la somme actualisée des gains de confort diminue de 21 % avec l'instruction de 2004 par rapport à celle de 1998 (hors effet du taux d'actualisation et de la durée des calculs).

3.3.3 - Des écarts de valeur du temps très variables

Valeur du temps des PL

Dans l'instruction de 1998, la valeur du temps des PL est constante dans le temps.

Dans l'instruction de 2004, la valeur du temps des PL est décomposée en deux éléments : la valeur du temps des transporteurs et celle des chargeurs. Cette dernière est de 6.75 € et croît comme les 2/3 du PIB.

Au final l'écart entre les deux instructions varie de 19 % à 35 % (cf. Tableau 9). Globalement sur la durée de vie du projet, les résultats monétarisés de gains de temps des PL, toutes choses égales par ailleurs, sont donc supérieurs d'au moins 20 % dans l'instruction de 2004 par rapport à l'instruction de 1998. Ceci n'est pas négligeable dans la rentabilité globale des projets, puisque les gains de temps des PL peuvent représenter de l'ordre de 20 % de l'avantage total.

		Instruction 1998	Instruction 2004	Instruction 1998	Instruction 2004		
	Unité de référence	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2050	Valeur en euros 2000 année 2050	Ecart année 2000	Ecart année 2050
Temps PL	Heure de véhicule	32 €	30 €	32 €	43 €	19 %	35 %

Tableau 9 : la valeur du temps des PL dans les instructions de 1998 et 2004

Valeur du temps des VL

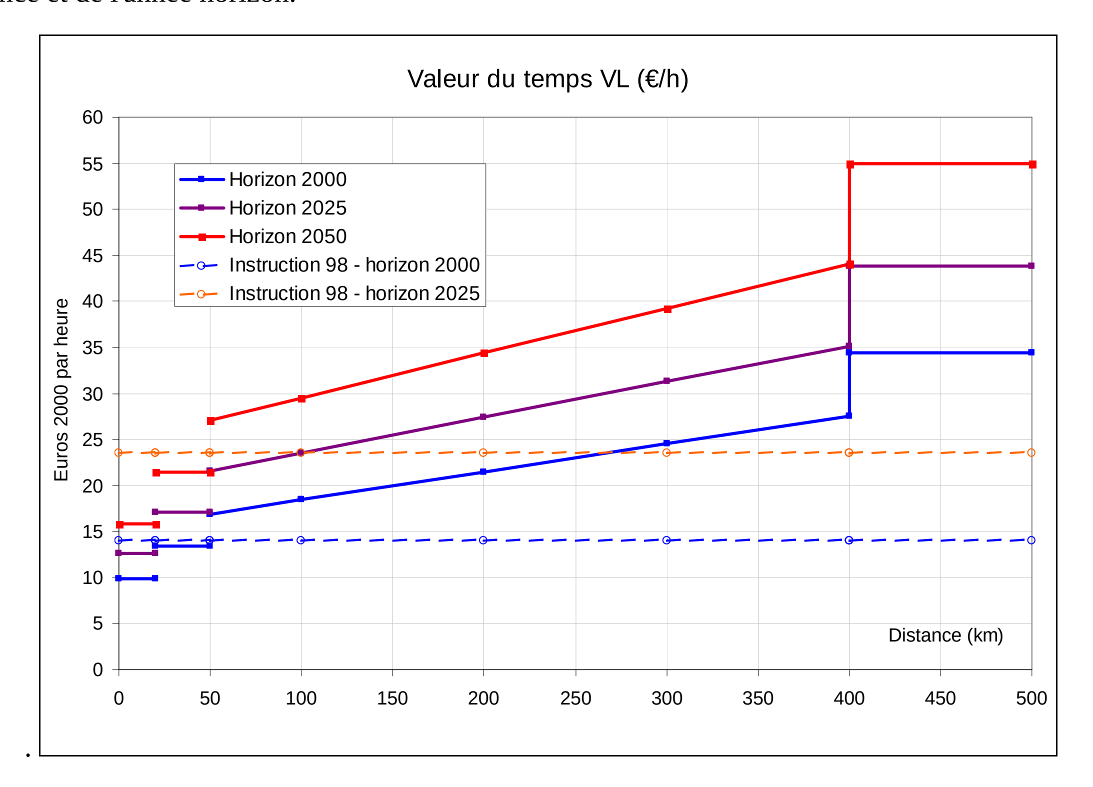
La valeur du temps des VL est appréciée par deux approches distinctes dans les instructions de 1998 et 2004.

Dans l'instruction de 1998, une valeur du temps identique est retenue pour tous les VL, elle croît comme la consommation finale des ménages par tête jusqu'en 2025.

Dans l'instruction de 2004, la valeur du temps varie avec la distance parcourue et elle croît comme 0,7 fois la consommation finale des ménages par tête jusqu'en 2050.

Au final, les valeurs retenues sont très différentes et les écarts varient de - 45 % à plus de + 145 % en fonction de la distance parcourue et de l'année horizon.

Les courbes suivantes permettent de comparer les valeurs du temps VL entre les deux instructions en fonction de la distance et de l'année horizon.



Les évolutions extrêmes entre les deux instructions se situent :

- au niveau des déplacements inférieurs à 20 km, avec une baisse de la valeur du temps en 2025 de 46 %, (- 29 % en 2000, - 33 % en 2050) ;
- au niveau des déplacements de plus de 400 km, on a une augmentation de la valeur du temps en 2000 de 145 % (86 % en 2025, 134 % en 2050).

La valeur du temps VL de l'instruction de 1998 (qui équivaut à 14 €$_{2000}$) est proche de la valeur du temps de l'instruction de 2004 pour la classe de distance [20 km ; 50km] 13,41 €$_{2000}$. Pour cette classe de distance, les écarts sont alors de - 4 % en 2000, - 27 % en 2025, et - 9 % en 2050.

Globalement, les gains monétarisés de temps des VL peuvent donc fortement varier entre les deux instructions. Les écarts entre les résultats des deux logiciels sont plus ou moins importants selon la classe de distance dominante des OD qui se trouvent dans la zone d'influence du projet. Cette évolution de la valeur du temps a un impact non négligeable sur la rentabilité des projets, puisque les gains de temps des VL représentent en général plus de la moitié des avantages d'un projet.

		Instruction 1998	Instruction 2004	Instruction 1998	Instruction 2004		
	Unité de référence	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2050	Valeur en euros 2000 année 2050	Ecart année 2000	Ecart année 2050
Temps VL	Heure de véhicule	14 €	de 9,88 € à 34,36 €	23 €	de 16 € à 55 €	- 30 % à 150 % selon la distance	- 30 % à 140 % selon la distance

Tableau 10 : la valeur du temps des VL dans les instructions de 1998 et 2004

De façon générale, un projet qui n'impacterait que des déplacements de courte distance aura des avantages de temps VL plus faibles avec l'instruction 2004. Mais en ce qui concerne les projets routiers interurbains, les usagers qui empruntent le projet dans toute sa longueur parcourent en général des distances importantes, et sont généralement ceux qui ont les gains de temps unitaires les plus importants. Si ces usagers représentent une part importante des gains totaux, alors les avantages de temps VL seront nettement plus importants avec l'instruction 2004.

Dans l'exemple de la déviation de Léguevin (*cf.* **Tableau 17**), la somme actualisée des gains de temps VL et PL diminue de 12 % avec l'instruction de 2004 par rapport à celle de 1998 (hors effet du taux d'actualisation et de la durée des calculs). Ceci est lié au fait que dans l'exemple retenu on a considéré que la distance parcourue par les usagers empruntant le projet ou son axe concurrent était en moyenne comprise entre 20 et 50 km.

3.3.4 - Deux effets contradictoires pour la sécurité

Deux paramètres interviennent dans la valorisation de la sécurité routière : les risques d'accidents retenus sur chaque infrastructure et la valorisation de l'insécurité. Entre les instructions de 1998 et 2004, ces deux paramètres ont été fortement modifiés.

Sur le risque tout d'abord, l'instruction de 1998 et la déclinaison routière de 2007 de l'instruction cadre de 2004 préconisent des ratios très différents. Le risque d'être victime d'un accident ou d'être tué diminue en moyenne de 50 % entre les deux instructions, conformément à la baisse d'insécurité observée entre ces deux périodes. La variation est différente selon les paramètres (taux d'accident et taux de tués) et selon les types de routes donc le nombre d'accidents ou de vie épargnées ne sont pas les mêmes selon que le projet est évalué avec l'instruction de 1998 ou de 2004. En particulier, la diminution du risque est beaucoup moins importante sur les voies express à 2x2 voies que sur les 7m, donc le gain en nombre d'accidents et de tués, sur un projet d'aménagement d'une 7 m à 2x2 voies express, est nettement moins important avec l'instruction de 2004 qu'avec l'instruction de 1998.

	Instruction 1998	Instruction 2004		Instruction 1998	Instruction 2004	
	Nombre d'accidents pour 10^8 véh x km	Nombre d'accidents pour 10^8 véh x km	Ecart risque d'accidents	Nombre de tués pour 10^8 véh x km	Nombre de tués pour 10^8 véh x km	Ecart risque tués
< 7 m (1)	19,1	9,4	- 51 %	3,247	1,6168	- 50 %
7 m	16,5	7,8	- 53 %	3,135	1,677	- 47 %
3 voies 9 m (1)	13,1	7,8	- 40 %	2,751	1,9344	- 30 %
3 voies 10,50 m	12,4	6,3	- 49 %	2,852	1,5435	- 46 %
4 voies 14 m (1)	13,8	6,1	- 56 %	2,484	1,1956	- 52 %
2 x2 voies (2)	9,6	4,8	- 50 %	2,016	0,6336	- 69 %
7 m express	12	6,6	- 45 %	2,4	1,65	- 31 %
2 x 2 express	7	4,8	- 31 %	0,77	0,6336	- 18 %
Autoroute (3)	7	3,8	- 46 %	0,77	0,3344	- 57 %

Tableau 11 : les risques d'insécurité dans les instructions de 1998 et 2004

(1) ces profils de route concernent le réseau existant, ils ne doivent plus être proposés en situation d'aménagement
(2) route avec carrefours à niveau avec ou sans traversée du terre-plein central.
(3) urbaines et interurbaines.

Concernant la valorisation des gains d'insécurité, elle a considérablement augmenté dans l'instruction de 2004 grâce à une réévaluation de la valeur des préjudices et une croissance plus importante de cette valeur sur le long terme. Ainsi, dans l'instruction de 2004 la valorisation du tué est supérieure de 45 % en 2000 et de 70 % en 2050 à la valeur de l'instruction de 1998.

		Instruction 1998	Instruction 2004	Instruction 1998	Instruction 2004		
	Unité de référence	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2050	Valeur en euros 2000 année 2050	Ecart année 2000	Ecart année 2050
Coût accident	accident						
1 tué		691 174 €	1 000 000 €	1 162 067 €	1 960 000 €	45 %	69 %
1 blessé grave		71 172 €	150 000 €	119 661 €	294 000 €	111 %	146 %
1 blessé léger		15 131 €	20 000 €	25 440 €	39 200 €	32 %	54 %
dégâts matériels		3 848 €	3 400 €	6 470 €	6 664 €	- 12 %	3 %

Tableau 12 : la valorisation de l'insécurité dans les instructions de 1998 et 2004.

Compte tenu des évolutions opposées du risque et de la valorisation de l'insécurité entre les deux instructions, aucune tendance ne peut se dégager sur l'évolution des gains monétarisés d'insécurité routière. On peut simplement en déduire que les chiffres ont une faible chance d'être proches.

Dans l'exemple de la déviation de Léguevin (cf. **Tableau 17**), la somme actualisée des gains d'insécurité routière diminue de 41 % avec l'instruction de 2004 par rapport à celle de 1998 (hors effet du taux d'actualisation et de la durée des calculs). C'est l'effet de l'évolution du risque d'accident qui explique l'écart constaté. En effet, la déviation de Léguevin consiste à reporter les usagers d'une 7m urbaine ou interurbaine vers une 2x2 voies express. Or entre les instructions de 1998 et 2004, le risque d'accident a beaucoup baissé sur les 7m, mais peu sur la 2x2 voies, donc le nombre d'accidents et vies épargnées est beaucoup plus important avec les standards de 1998 que ceux de 2004 (environ 60 % de vies épargnées en plus la première année). Cet effet est ici plus important que l'effet de l'augmentation de la valorisation de l'insécurité entre les instructions de 1998 et 2004.

3.3.5 - Une augmentation des coûts du carburant

La valeur du carburant a augmenté de 17 % pour les PL et de 26 % pour les VL entre les instructions de 1998 et 2004. Cette revalorisation est liée à l'évolution des prix du carburant observée sur le marché indépendamment de l'inflation (source : ministère chargé de l'économie). Les coûts monétarisés de carburant sont donc supérieurs de 20 % environ, toutes choses égales par ailleurs, dans l'instruction de 2004 par rapport à l'instruction de 1998.

Notons que les instructions de 1998 et 2004 ne préconisent pas de règles d'évolution dans le temps du prix du carburant exprimé en monnaie constante. Il est donc considéré que les augmentations de carburant sont uniquement liées à l'inflation. Compte tenu de la forte volatilité actuelle des prix du carburant, cette hypothèse est discutable et constitue une des limites du calcul actuel.

		Instruction 1998	Instruction 2004	
	Unité de référence	Valeur en euros 2000 quelle que soit l'année	Valeur en euros 2000 quelle que soit l'année	Ecart
Carburant TTC	Litre			
VL		0,85 €	1,00 €	17 %
PL		0,56 €	0,71 €	26 %

Tableau 13 : la valeur du carburant des instructions de 1998 et 2004

Dans l'exemple de la déviation de Léguevin (cf. **Tableau 17**), la somme actualisée des coûts de carburant augmente de 25 % avec l'instruction de 2004 par rapport à celle de 1998 (hors effet du taux d'actualisation et de la durée des calculs).

3.3.6 - Le calcul des coûts environnementaux

L'instruction de 2004 a introduit le calcul des coûts de pollution de l'air et d'effet de serre comme partie intégrante de la rentabilité modifiant ainsi la composition du bénéfice actualisé. L'impact de cet ajout dépend de la teneur des projets. Cependant, il reste en général limité, la somme de ces deux coûts représentant souvent de l'ordre de 5 % du bénéfice actualisé.

Les valeurs retenues sont les suivantes :

		Instruction 2004	
	Unité de référence	Valeur en euros 2000 année 2000	Valeur en euros 2000 année 2050
Croissance de la pollution de l'air		Pour les VL, - 4,1 % /an de 2000 à 2020, + 1,4 % /an de 2020 à 2025, + 1,3 % /an de 2025 à 2050, 0 % ensuite Pour les PL, - 5,1 %/an de 2000 à 2020, + 1,4 % /an de 2020 à 2025, + 1,3 % /an de 2025 à 2050, 0 % au-delà	
Pollution de l'air VL	véhicule/km		
Urbain dense		0,029 €	0,0186 €
Urbain diffus		0,010 €	0,0064 €
Rase campagne		0,001 €	0,0006 €
Pollution de l'air P L			
Urbain dense		0,282 €	0,1466 €
Urbain diffus		0,099 €	0,0514 €
Rase campagne		0,006 €	0,0031 €
Croissance de l'effet de serre		+ 3 % par an à partir de 2010	
Effet de serre :	litre de carburant		
VL		0,069 €	0,23 €
PL		0,073 €	0,24 €

Tableau 14 : valeurs des coûts d'effet de serre et de pollution de l'air dans l'instruction de 2004

L'instruction de 2004 recommande également d'intégrer les gains ou coûts liés au bruit dans le calcul du bénéfice actualisé. Leur valorisation est fonction de la dépréciation ou revalorisation des loyers des logements dont les volumes de nuisances sonores sont supérieurs à 50 dB et varient de plus ou moins 2dB après la mise en service du projet. Ce calcul nécessite l'utilisation de modèles de bruits routiers et peut être complexe à mettre en œuvre. En pratique, il n'est réalisé que pour les projets importants. Peu de calculs de gains ou coûts liés au bruit ont été réalisés jusqu'à présent mais il semblerait qu'ils représentent une part très faible du bénéfice actualisé (moins de 5 %). Dans l'exemple développé en partie 4, nous n'étudierons pas les effets liés aux bruits.

3.4 - Les coûts d'entretien, d'exploitation et de grosses réparations des chaussées

Les coûts d'entretien et de grosses réparations ont fortement évolué de 1998 à 2004. Ils ont été divisés par deux voire par trois selon les types de routes pour le non concédé comme le montre le Tableau 15, excepté sur les voies rapides urbaines où le coût d'entretien courant a augmenté. Les chiffres retenus dans les instructions sont issus de l'observation des budgets programmés sur le réseau. Leur estimation est complexe car elle nécessite de trouver une clef de passage entre une nomenclature de programmation et une nomenclature physique des projets. De 1998 à 2004, la connaissance des budgets s'est affinée, avec notamment une meilleure imputation des dépenses de personnels depuis la mise en œuvre de la LOLF (Loi Organique relative aux Lois de Finances). Des évolutions dans les techniques d'entretien, notamment sur les dépendances et la gestion des personnels peuvent également expliquer les écarts.

Ecarts 2004/1998 comparaison des chiffres convertis en euros 2000	Voies Rapides Urbaines		Autoroutes non concédées et voies assimilées	Grandes Liaisons d'Aménagement		4 voies	3 voies	2 voies	2 voies
	2 x 3 voies	2 x 2 voies		2 x 2 voies	3 voies	14 m	9 m ou 10,50 m	7 m	6 m
Grosses réparations HT	- 30 %	- 31 %	- 45 %	- 42 %	- 41 %	- 43 %	- 43 %	- 43 %	- 44 %
Entretien courant HT	42 %	27 %	- 56 %	- 63 %	- 52 %	- 74 %	- 70 %	- 63 %	- 61 %
Viabilité hivernale									
Zone H1,H2 HT	1 %	1 %	1 %	1 %	- 7 %	1 %	- 19 %	- 7 %	- 7 %
Zone H3 HT	4 %	4 %	4 %	4 %	42 %	38 %	36 %	42 %	42 %
Zone H4 HT	2 %	2 %	2 %	2 %	1 %	2 %	0 %	1 %	1 %

Tableau 15 : les coûts d'entretien, d'exploitation et de grosses réparations pour le non concédé dans les instructions de 1998 et 2004

Pour le concédé, les écarts sur les coûts des grosses réparations et de l'entretien sont faibles (inférieurs à 10 %). En revanche, les ratios fournis pour les Investissements Complémentaires sur Autoroute en Service (ICAS) ont diminué de plus de 50 % en 2004. Les évolutions constatées proviennent essentiellement d'un changement de sources statistiques, de modifications dans le contexte d'attribution des concessions et de la charge des réseaux. En effet, avant 2001, les coûts étaient renseignés à partir de statistiques sur les projets d'extension du réseau des Sociétés d'Economie Mixtes Concessionnaires d'Autoroutes. Ces projets étaient attribués par le système dit d'adossement. Les réseaux concernés présentaient souvent des trafics importants avec des prévisions de croissance élevées, d'importants ICAS (aires de service, nouveaux échangeurs, élargissements) devaient donc être mis en œuvre pour répondre à la nouvelle demande de transport. Depuis 2001, la construction du réseau autoroutier concédé fait l'objet de contrats spécifiques après appels à candidatures. Les candidats font état de prévisions de coûts normalisées sur la durée souhaitée de la concession et ce sont ces coûts qui ont été utilisés pour actualiser les valeurs de 1998. L'échantillon étant relativement restreint en 2004, seules les valeurs en plaine ont pu être estimées, les autres valeurs ont été déduites de la donnée en plaine à partir des ratios plaine/vallonné et plaine/montagne observés en 1998. Le réseau de l'échantillon supporte un trafic moindre que celui concédé avant 2001, il nécessite donc moins d'aménagement après la mise en service pour s'adapter à la demande ce qui explique l'importante diminution du montant des ICAS entre les deux instructions.

	Instruction 1998 en euros 2000			Instruction 2004 en euros 2000			Ecart		
	Montagne	Vallonné	Plaine	Montagne	Vallonné	Plaine	Montagne	Vallonné	Plaine
Grosses réparations et IMMOS	41 999	34 169	28 118	46 000	17 000	31 000	10 %	8 %	10 %
ICAS	19 129	11 873	11 873	8 000	6 000	6 000	- 58 %	- 49 %	- 49 %
Entretien et exploitation	100 592	93 995	87 399	105 000	95 000	90 000	4 %	1 %	3 %

Tableau 16 : les coûts d'entretien, d'exploitation et de grosses réparations pour le concédé dans les instructions de 1998 et 2004

Dans les instructions de 1998 et 2004, les coûts d'entretien, d'exploitation et de grosses réparations du réseau concédé ou non concédé en euros constants n'évoluent pas dans le temps.

Globalement les coûts de grosses réparations, d'entretien et d'exploitation sont donc de l'ordre de deux fois plus faibles, toutes choses égales par ailleurs, lorsqu'on évalue un projet non concédé avec l'instruction de 2004 plutôt qu'avec l'instruction de 1998. Cet effet reste cependant limité puisque l'ensemble de ces coûts représente une part très faible de l'avantage total du projet (moins de 1 % dans l'exemple de la déviation de Léguevin développé en partie 4) et du coût d'investissement total (de l'ordre de 5 %).

Pour les projets concédés, les écarts sur les ICAS et les autres coûts se compensent et les résultats des deux instructions sont proches.

Dans l'exemple de la déviation de Léguevin (cf. **Tableau 17**), la somme actualisée des coûts d'entretien de la voirie diminue de 39 % avec l'instruction de 2004 par rapport à celle de 1998 (hors effet du taux d'actualisation et de la durée des calculs).

4 - La déviation de Léguevin, un projet analysé selon les deux méthodes

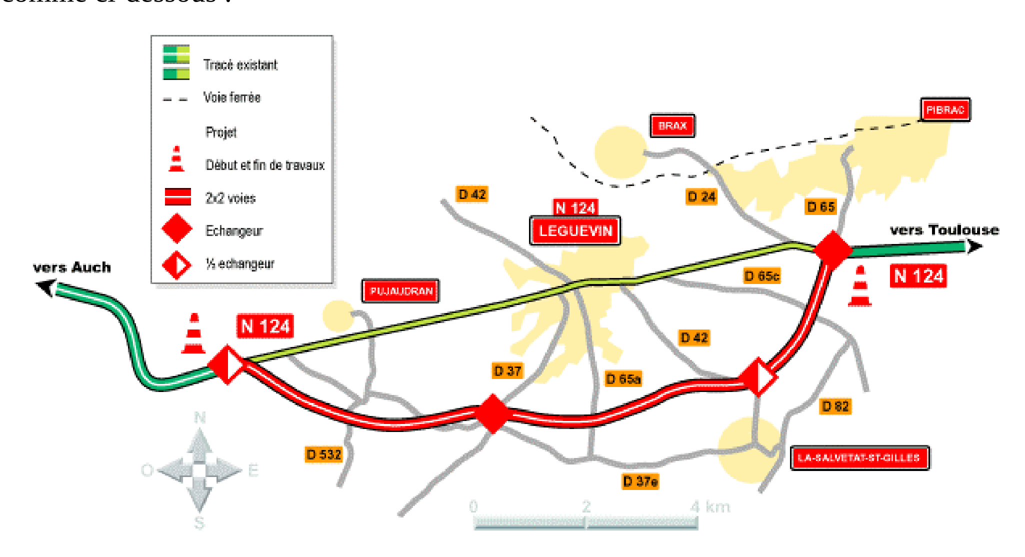
Pour apprécier les effets de la combinaison de toutes ces évolutions, un calcul de rentabilité socio-économique a été conduit à l'aide d'un tableur sur la déviation de Léguevin selon la méthode préconisée par l'instruction de 1998 et celle préconisée par l'instruction de 2004.

Après une description rapide du projet, cette partie fournit les résultats des tests effectués.

Dans un premier temps, pour distinguer l'effet de l'évolution des valeurs tutélaires seul, on raisonne à taux d'actualisation et durée de calcul identiques, puis on introduit le changement de taux d'actualisation et de durée de calcul.

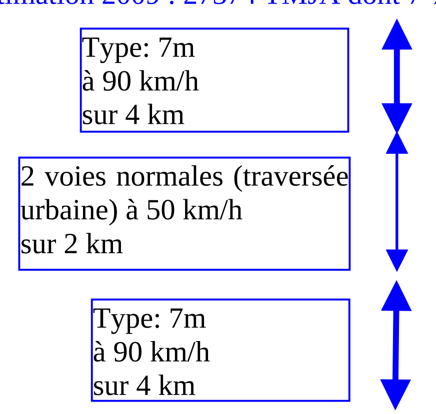
4.1 - Le projet

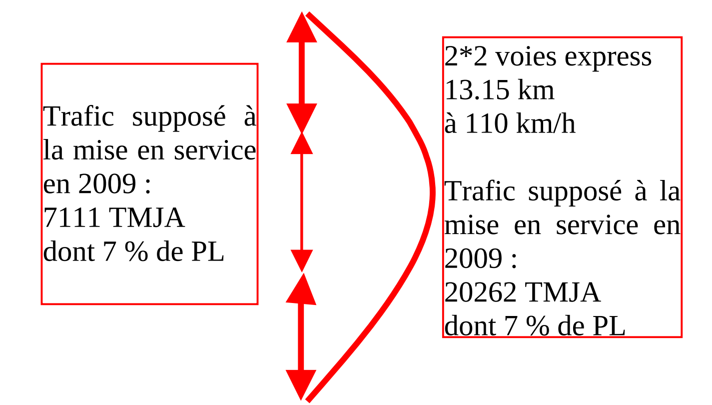
Le projet de déviation est un projet de 13 km, simple et facilement évaluable à l'aide d'un tableur. Il peut se schématiser comme ci-dessous :



SITUATION DE REFERENCE
(SANS PROJET)
Trafic 2005 : 25370 TMJA dont 7 % de PL
Estimation 2009 : 27374 TMJA dont 7 % de PL

SITUATION PROJET :
Caractéristiques identiques à la référence, la déviation en plus.





Pour réaliser le bilan socio-économique du projet entre sa mise en service en 2009 et 2059, on choisit le scénario central de cadrage macro-économique (PIB 1.9%) et les hypothèses moyennes de croissance de trafic, tel qu'indiqué au chapitre II § 4.1 - Projections de la matrice de demande.

On considère que l'infrasctructure supporte le trafic issu de la demande de transport d'un seul itinéraire Origine/Destination dont la longueur totale est comprise entre 20 et 50 km. Les taux de croissance linéaire en base 2002 retenus sont donc les suivants :

Taux de croissance annuel linéaire base 2002	2002-2025	2025-2050	Au-delà de 2050
VL	2,1 %	1,05 %	0 %
PL	1,5 %	0,75%	0 %

Voici les coefficients multiplicateurs correspondants à ces hypothèses pour chacun des paramètres :

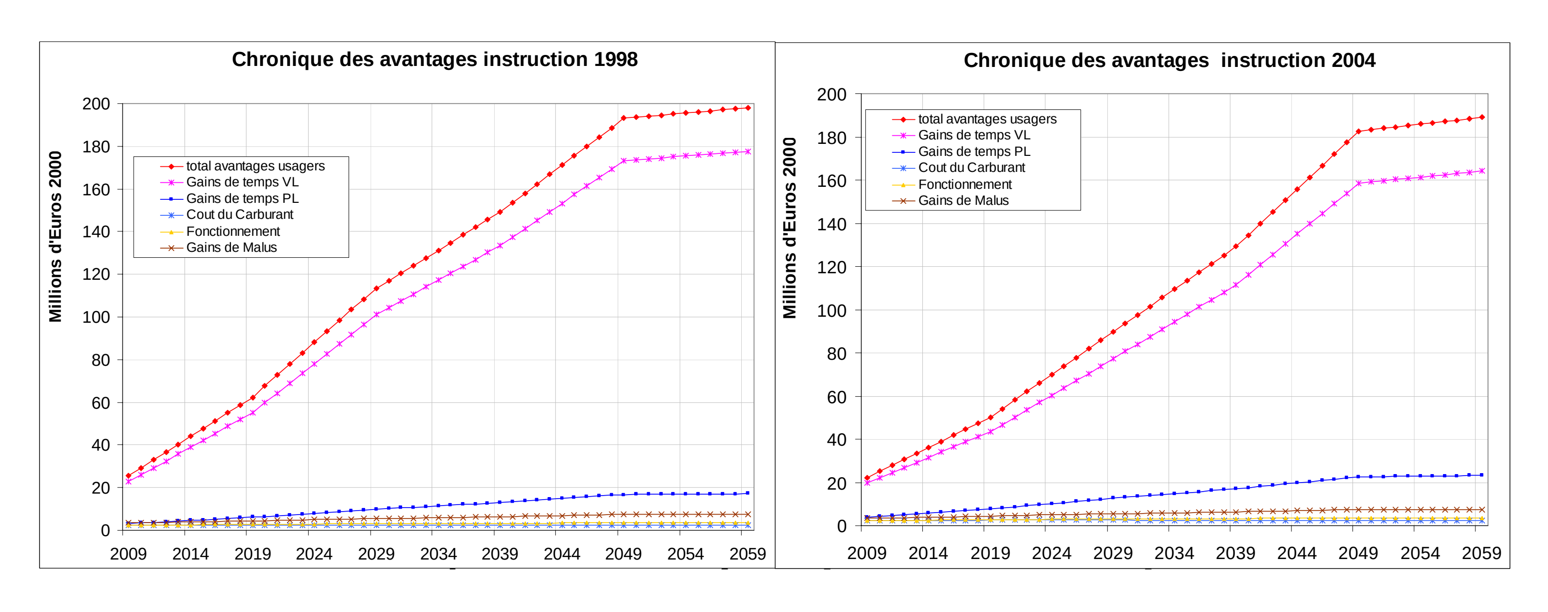
Coefficients multiplicateurs par rapport au trafic 2009	2009	2025	2050
Demande de Trafic VL	1	1,29	1,52
Demande de Trafic PL	1	1,22	1,39

Ces hypothèses correspondant à l'instruction en vigueur sont également prises pour les calculs effectués avec l'instruction de 1998 afin de ne pas introduire un biais lié à la croissance des trafics dans la comparaison entre les instructions.

Les tests sont effectués toutes choses égales par ailleurs avec notamment **les mêmes répartitions de trafic pour toutes les années d'affectation** (on ne fait pas de calcul d'affectation). **Les temps de parcours sont calculés tous les 10 ans, en fonction de la demande de trafic et à partir des courbes-temps débits des modules Sétra de TransCAD.** Les avantages sont ensuite calculés par interpolation entre les années de calculs (2009, 2019, 2029, 2039, 2049 et 2059).

4.2 - Les évolutions sur la rentabilité hors effet de l'actualisation et des périodes de calcul

Les graphes ci-dessous présentent les résultats relativement similaires obtenus avec l'instruction de 1998 et de 2004 pour chacun des avantages usagers suivants : Total, Temps VL, Temps PL, Coût du carburant (VL+PL), Coût d'entretien des véhicules (VL+PL) et malus (VL).



Etant donné que tous les paramètres sont stables à partir de 2050, il n'y a plus de croissance avantages à partir de 2050 et on devrait observer que les courbes font un pallier à partir de 2050. La dernière partie de la courbe correspond ici à l'interpolation entre l'année 2049 et 2059 : le passage de la valeur de 2049 à celle de 2050 se fait sur 10 ans. La limitation du nombre d'années de calcul à un tous les 10 ans, introduit un biais dans le bénéfice actualisé mais qui est non significatif ici. L'utilisation d'un tableur de calcul simplifé du bilan permet ainsi de comparer efficacement les deux instructions.

Dans les deux cas, les avantages de temps représentent une part largement prédominiante des avantages totaux. Les seules différences remarquables sont les gains de temps VL légèrement plus élevées avec l'instruction de 1998, et l'inverse pour les gains de temps PL (différences directement liées aux valeurs du temps). On remarque également la croissance des gains de temps VL un peu plus rapide avec l'instruction 1998, croissance qui est légèrement ralentie après 2025 (arrêt de la croissance de la valeur du temps).

Cette croissance des gains de temps s'explique principalement par la croissance des trafics. Cela joue à la fois directement sur le total des gains de temps, mais également sur le temps unitaire gagné par chaque véhicule. En effet, les gains de temps unitaires (ici très similaires pour les VL et les PL) passent d'environ 9 min à la mise en service, à 14 min en 2019, 20 min en 2029 et monte jusqu'à 31 min en 2049 !

La raison de cette forte croissance des gains de temps unitaires se trouve au niveau du scénario de référence où les vitesses en charge sur la route déviée deviennent très faibles avec la croissance des trafics dans la traversée de Léguevin, avec des vitesses en dessous de 10 km/h en moyenne annuelle. Ces vitesses ne sont pas vraiment crédibles et pointent une des limites des calculs de bilan socio-économique. Ceci explique également la rentabilité très élevée obtenue ci-dessous. Cet exemple simple nous permet cependant de comparer les deux instructions.

Le Tableau 17 ci-dessous récapitule les sommes actualisées et les résultats du calcul de la rentabilité effectués selon les standards de l'instruction de 2004 ou de l'instruction de 1998 avec cependant :

- prise en compte du même taux d'actualition ;
- calcul sur la même durée de vie.

	Instruction 2004	Instruction 1998	
Taux d'actualisation	4 % constant		
Durée du calcul	50 ans après la mise en service		
Hypothèses de trafic	identiques		
Valeurs tutélaires	Valeurs et croissances spécifiques à chaque circulaire		Ecarts 2004/1998
SA_Temps_VL + PL	1 502 075 170 €	1 715 017 497 €	-12%
dont SA_Temps_VL	1 296 701 181 €	1 556 338 385 €	-17%
SA_Temps_PL	205 373 989 €	158 679 112 €	29%
SA_Carburant VL + PL	-45 632 021 €	-36 551 228 €	-25%
TIPP	22 780 744 €	21 787 362 €	5%
TVA fonctionnement	15 419 515 €	13 381 446 €	15%
SA – Entretien_véhicules_VL + PL	-53 287 232 €	-52 123 432 €	-2%
SA_Malus_VL	93 713 322 €	118 804 897 €	-21%
SA_Sécurité	29 814 799 €	50 899 170 €	-41%
SA_Effet de serre et pollution	-3 327 852 €	NS	NS
Avantage Net Global	1 560 329 318 €	1 839 335 794 €	-15%
Coût d'investissement HT	-52 163 328 €	-52 281 857 €	0%
Bénéfice actualisé	1 508 165 990 €	1 787 053 937 €	-16%
Bénéfice actualisé par unité monétaire investie	28,9	34,2	-15%
SA_Coût investissement_TTC	-62 387 340 €	-62 529 101 €	0%
SA_Coût entretien voirie_TTC	-1 336 340 €	-2 181 860 €	39%
TRI sans résidus	33,0%	35,0%	-6%

Tableau 17 : comparaison de la rentabilité de la déviation de Léguevin avec les instructions de 1998 et 2004 à taux d'actualisation et durée de calcul identiques

Légende :
SA : somme actualisée sur 50 ans des gains ou des coûts
Les avantages négatifs qui représentent donc des coûts sont en rouge et les gains en noir.
NS : non significatif : les coûts environnementaux n'étaient pas inclus dans le calcul du bénéfice actualisé en 1998. A noter que ces coûts ont connu une sensible revalorisation entre 1998 et 2000 : la tonne de carbone par exemple était de l'ordre de 74€ valeur 2000 à l'année 2000 dans l'instruction de 1998 contre 100€ valeur 2000 à l'année 2000 dans l'instruction de 2004.

On constate que la rentabilité du projet, en termes de bénéfice actualisé et de bénéfice actualisé par euro public investi, est inférieure de 15 % avec l'instruction 2004 par rapport au même calcul réalisé avec l'instruction de 1998 (à taux d'actualisation et durée de calcul identiques).

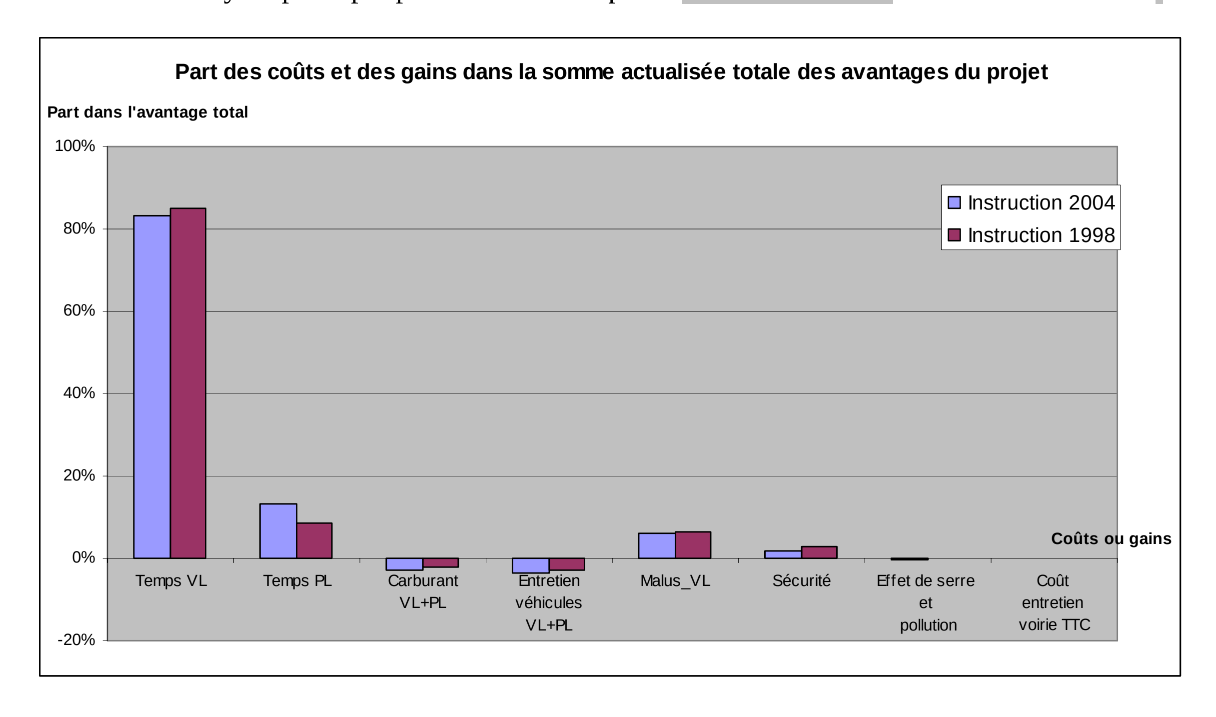
L'écart provient principalement des postes sécurité, malus et valeur du temps plus valorisés par l'instruction de 1998. Pour la valeur du temps, on se situe dans la classe de distance [20km;50km] ce qui explique que la valeur de l'instruction de 1998 soit supérieure à celle de 2004 (cf. 03.3.3 - Des écarts de valeur du temps).

Le poste coût d'entretien des véhicules est très proche dans les deux instructions.

Le coût du carburant de l'instruction de 2004 est supérieur de 25 % au coût de l'instruction de 1998.

Le coût d'entretien et d'exploitation est 39 % plus faible avec l'instruction de 2004 qu'avec celle de 1998.

On retrouve ici les analyses poste par poste réalisées en partie 03 - Influence des différentes évolutions.



Au final la répartition des gains et des coûts dans la somme actualisée globale des avantages du projet change peu entre les deux instructions. Les gains de temps représentent plus de 94 % des avantages nets sur ce petit projet, viennent ensuite le malus d'inconfort et la sécurité qui représentent respectivement 6 % et 3 % des avantages. Les coûts de carburant et d'entretien des véhicules sont les plus importants, ils diminuent chacun les avantages net globaux de 3 %. Notons que cette répartition des avantages n'est pas spécifique à ce petit projet. On retrouve des proportions du même ordre de grandeur sur le Grand Contournement de Strasbourg.

4.3 - Les évolutions sur la rentabilité avec effet de l'actualisation hors effet des périodes de calcul

Le même test est ensuite effectué en retenant une actualisation de 8 % pour le calcul de la rentabilité socio-économique selon l'instruction de 1998 et de 4 % variable dans le temps pour le calcul selon l'instruction de 2004. La durée de calcul est semblable pour les deux tests.

	Instruction 2004	Instruction 1998	
Taux d'actualisation	4 % variable	8 % contant	
Durée du calcul	50 ans après la mise en service		
Hypothèses de trafic	identiques		
Valeurs tutélaires	Valeurs et croissances spécifiques à chaque circulaire		Ecarts 2004/1998
SA_Temps_VL + PL	1 549 115 519 €	636 985 062 €	143 %
dont SA_Temps_VL	1 337 831 888 €	575 958 712 €	132%
SA_Temps_PL	211 283 631 €	61 026 340 €	246%
SA_Carburant VL + PL	- 46 283 366 €	- 17 873 459 €	- 159 %
TIPP	23 104 837 €	10 699 721 €	116 %
TVA fonctionnement	15 671 079 €	10 989 185	43 %
SA – Entretien_véhicules_VL + PL	- 53 287 200 €	- 52 123 432 €	- 2 %
SA_Malus_VL	95 701 753 €	52 233 637 €	83 %
SA_Sécurité	30 490 505 €	22 422 914 €	30 %
SA_Effet de serre et pollution	- 3 431 315 €	NS	NS
Avantage Net Global	1 6008 892 336 €	690 455 396 €	133 %
Coût d'investissement HT	- 52 200 821 €	- 47 522 396 €	- 10 %
Bénéfice actualisé	1 556 691 515 €	642 932 999 €	142 %
Bénéfice actualisé par unité monétaire investie	29,8	13,5	120 %
SA_Coût investissement_TTC	- 62 432 162 €	- 56 836 788 €	- 10 %
SA_Coût entretien voirie_TTC	- 1 356 227 €	- 1 063 434 €	- 28 %
TRI sans résidus	33 %	35 %	- 6 %

Tableau 18 : comparaison de la rentabilité de la déviation de Léguevin avec les instructions de 1998 et 2004 à durée de calcul identique mais avec effet du taux d'actualisation

Légende :

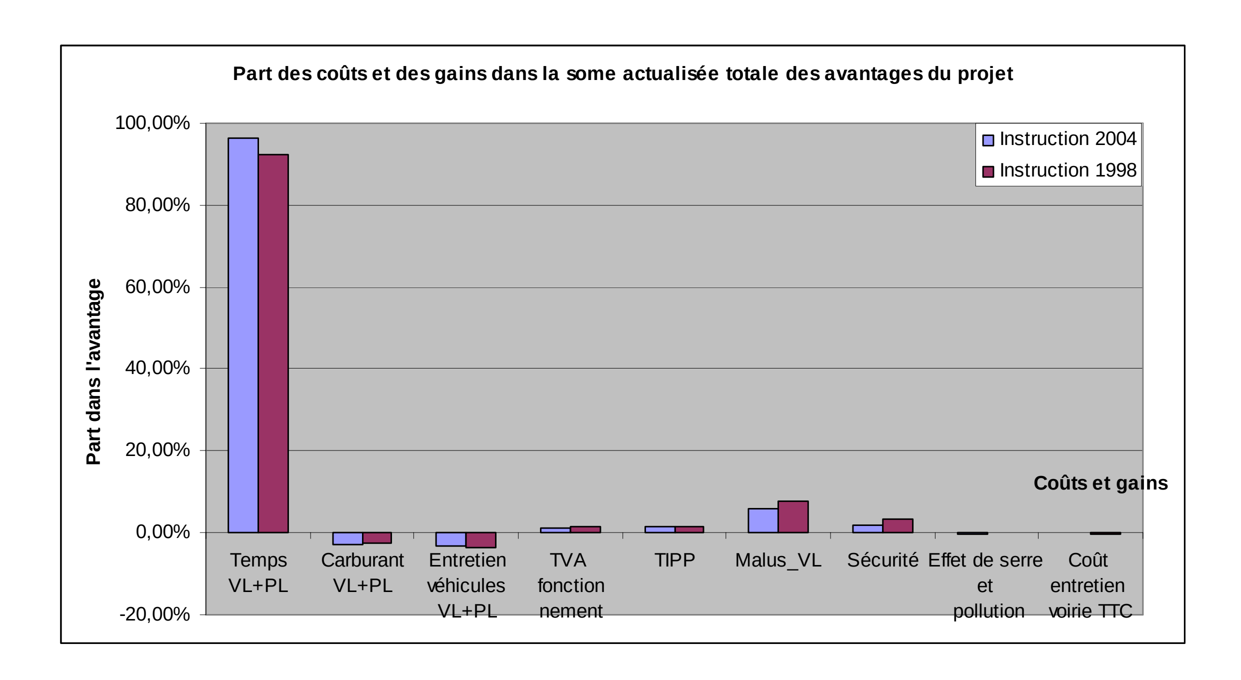
SA : somme actualisée sur 50 ans des gains ou des coûts

Les avantages négatifs qui représentent donc des coûts sont en rouge et les gains en noir.

NS : non significatif : les coûts environnementaux n'étaient pas inclus dans le calcul du bénéfice actualisé en 1998. A noter que ces coûts ont connu une sensible revalorisation entre 1998 et 2000 : la tonne de carbone par exemple était de l'ordre de 74€ valeur 2000 à l'année 2000 dans l'instruction de 1998 contre 100€ valeur 2000 à l'année 2000 dans l'instruction de 2004.

On constate que la rentabilité en termes de bénéfice actualisé et de bénéfice par euro investi est plus de deux fois plus importante avec l'instruction de 2004 qu'avec l'instruction de 1998. L'effet s'inverse par rapport au premier test et montre l'influence importante du changement de taux d'actualisation de 8 % à 4 % sur cet indicateur.

Par définition, le TRI ne dépend pas du taux d'actualisation, ce que l'on vérifie ici : on obtient les deux mêmes valeurs proches entre elles quel que soit le taux d'actualisation.



La répartition des coûts et des gains dans l'avantage total du projet est quasiment similaire entre les instructions de 1998 et 2004 même lorsqu'on introduit les taux d'actualisation des instructions. Sur cet exemple, le passage d'un taux de 8 % à 4 % semble augmenter légèrement la part des gains de temps dans l'avantage global et diminuer celle des malus. Ceci étant, la prépondérance de ces gains de temps écrase tous les autres effets et les impacts du changement de taux d'actualisation sur la répartition des avantages ne sont pas discernables.

4.4 - Les évolutions sur la rentabilité avec effet de l'actualisation et des périodes de calcul

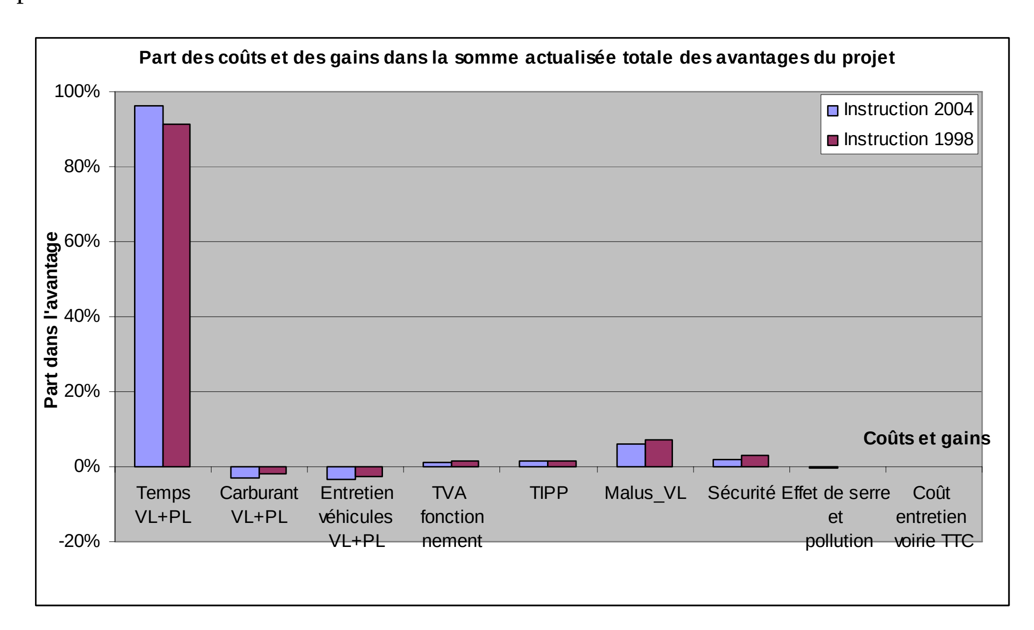
Cette fois, on tient compte de toutes les spécificités de chacune des instructions y compris les recommandations sur la durée du calcul.

	Instruction 2004	Instruction 1998	
Taux d'actualisation	4 % variable	8 % contant	
Durée du calcul	50 ans après la mise en service	30 ans avec valeur résiduelle	
Hypothèses de trafic	identiques		
Valeurs tutélaires converties en euros 2000	Valeurs et croissances spécifiques à chaque circulaire		Ecarts 2004/1998
SA_Temps_VL + PL	1 549 115 519 €	716 836 723 €	116 %
SA_Carburant VL + PL	- 46 283 368 €	- 15 227 074 €	- 204 %
SA – Entretien_véhicules_VL + PL	- 54 231 287 €	- 19 744 620 €	- 175 %
SA_Malus_VL	95 701 753 €	57 373 551 €	67 %
SA_Sécurité	30 490 505 €	24 637 356 €	24 %
SA_Effet de serre et pollution	- 3 431 315 €	NS	NS
Avantage Net Global	1 608 892 336 €	775 873 097 €	107 %
Coût d'investissement HT	- 52 200 821 €	- 47 440 556 €	- 10 %
Bénéfice actualisé	1 556 691 515 €	728 432 541 €	114 %
Bénéfice actualisé par unité monétaire investie	29,8	15,4	94 %
SA_Coût investissement_TTC	- 62 432 182 €	- 56 738 905 €	- 10 %
SA_Coût entretien voirie_TTC	- 1 356 227 €	- 1 143 435 €	- 19 %

Tableau 19 : comparaison de la rentabilité de la déviation de Léguevin avec les instructions de 1998 et 2004 avec effet du taux d'actualisation et de la durée de calcul

Légende :
SA : somme actualisée sur 50 ans des gains ou des coûts
Les avantages négatifs qui représentent donc des coûts sont en rouge et les gains en noir.
NS : non significatif : les coûts environnementaux n'étaient pas inclus dans le calcul du bénéfice actualisé en 1998. A noter que ces coûts ont connu une sensible revalorisation entre 1998 et 2000 : la tonne de carbone par exemple était de l'ordre de 74€ valeur 2000 à l'année 2000 dans l'instruction de 1998 contre 100€ valeur 2000 à l'année 2000 dans l'instruction de 2004.

Si l'on respecte toutes les recommandations des instructions, la rentabilité en termes de bénéfice actualisé et de bénéfice par euro investi est de l'ordre de deux fois plus importante avec l'instruction de 2004 qu'avec l'instruction de 1998. Ici, le passage d'une durée de calcul de 50 ans sans valeur résiduelle à 30 ans avec valeur résiduelle a augmenté le bénéfice actualisé. On constate que l'essentiel de l'écart sur la rentabilité entre les instructions de 1998 et 2004 est lié au changement de taux d'actualisation et que la durée des calculs joue relativement peu.



A nouveau, la répartition des coûts et des gains dans l'avantage net total du projet est semblable entre les instructions de 1998 et 2004 avec effet de l'actualisation et de la période de calcul. La part des gains de temps est légèrement plus importante avec l'instruction de 2004. La valorisation de ces gains est si importante qu'il n'est pas possible de voir l'effet de l'arrêt des calculs à 50 ans, au lieu de 30 ans avec valeur résiduelle sur la prise en compte des effets de long terme.

5 - Conclusion sur le changement d'instruction

Le passage de l'instruction de 1998 à celle de 2004 qui correspond au passage du logiciel Ariane 06 au logiciel TransCAD **change de façon importante la rentabilité des projets en termes de bénéfice actualisé et de bénéfice par unité monétaire investie**, toutes choses égales par ailleurs (en particulier à partir de trafics identiques à chaque année d'affectation).

Les tests effectués sur le projet de déviation de Léguevin montrent que le bénéfice actualisé estimé avec les standards de 2004 est deux fois plus important que celui estimé avec les standards de 1998.

Le principal déterminant de cet écart est le changement de taux d'actualisation survenu entre les deux instructions qui permet de mieux prendre en compte les coûts et les gains de long terme. Toutes choses égales par ailleurs, il entraîne une multiplication par trois du bénéfice actualisé sur le projet de Léguevin. Les analyses de la partie 03.1 Le taux d'actualisation indiquent qu'avec les règles actuelles de calcul socio-économique cette diminution du taux conduira toujours à une augmentation importante du bénéfice actualisé mais que la tendance pourrait s'inverser si certains coûts étaient fortement valorisés à long terme de sorte que le bénéfice annuel devienne négatif.

La durée des calculs a un impact moindre qui dépend fortement de la chronique des avantages. Avec la réduction du temps de calcul préconisée dans l'instruction de 2004, on ne spécule plus sur les avantages futurs des projets (cf. 03.2 - La durée des calculs). Pour les projets actuellement analysés, dont les avantages sont positifs et relativement stables sur du long terme, le passage d'un calcul à l'infini (en pratique 30 ans plus une valeur résiduelle) à un calcul sur 50 ans implique mécaniquement une diminution des bénéfices. Le phénomène contraire serait observé en cas de forte croissance de coûts ou de gains entre 30 ans et 50 ans après la mise en service.

Si l'on enlève les effets de l'actualisation et de la durée des calculs, on peut observer les effets de l'évolution des valeurs tutélaires entre les deux circulaires.

Les principaux changements portent sur :

- la valeur du temps : elle peut augmenter fortement entre les instructions de 1998 et 2004 si la zone d'influence du projet supporte une part non négligeable de trafics longue distance ;
- la sécurité, où deux effets contraires interviennent entre les instructions de 1998 et 2004 : les différences de risques d'accident entre infrastructures diminuent et la valeur de l'insécurité augmente ;
- le carburant, dont la valeur augmente à courbes de consommation égales : l'ordre de grandeur des écarts sur ce poste est de 20 % ;
- le malus d'inconfort, qui diminue et dont l'effet est plus ou moins marqué selon les types de routes présents dans la zone d'influence du projet ;
- les coûts d'entretien, d'exploitation et de grosses réparations qui ont diminué de moitié entre les instructions de 1998 et 2004 sauf pour les autoroutes concédées où la différence est minime.

La pollution et l'effet de serre sont des avantages non pris en compte dans l'instruction de 1998 qui apparaissent en 2004 mais leur influence sur le bénéfice actualisé est faible (de l'ordre de 10 % au plus).

Les coûts d'entretien et de dépréciation des véhicules restent globalement stables.

Dans les faits, on constate que les gains de temps représentent de 70 % à 90 % des avantages actualisés d'un projet quelle que soit l'instruction utilisée et qu'essentiellement leur valorisation influence le bénéfice actualisé. La valorisation actuelle des coûts environnementaux n'a pas atténué la part prépondérante de ces gains.

Finalement, les résultats bruts de rentabilité calculés avec l'instruction de 1998 et celle de 2004 semblent difficilement comparables compte tenu des forts changements liés à l'actualisation. Si l'on corrige l'effet de l'actualisation en retenant le même taux pour les deux calculs, deux cas se présentent :

- les trajets parcourus dans la zone testée ont principalement une distance comprise entre 20 et 50 km et les écarts observés devraient rester inférieurs à 50 % ;

- les trajets de plus de 50 km sont non négligeables dans la zone d'influence du projet, les gains de temps qui constituent l'essentiel du bénéfice actualisé vont alors varier fortement avec les deux méthodes et il n'est pas possible de présager de l'effet précis de cette évolution sur la rentabilité globale.

Chapitre V
Bilan – Améliorations à prévoir

1 - Bilan des comparaisons Ariane – TransCAD

Les études de comparaisons Ariane – TransCAD en Cété, ainsi que les approfondissements théoriques et les tests des modules Sétra ont mis en évidence quelques bonnes pratiques à observer ainsi que des améliorations du logiciel à prévoir. Ce dernier chapitre fait le bilan du passage d'Ariane à TransCAD.

1.1 - Synthèse sur la base des éléments théoriques

En ce qui concerne les deux lois d'affectation Prix-Temps et Abraham, les comparaisons sur des cas simples théoriques permettent de conclure que la loi d'arbitrage prix-temps (telle qu'elle est paramétrée par défaut dans les modules Sétra) est plus sensible à toutes les variables d'entrée que la loi d'Abraham. Il apparaît important que la variabilité des résultats soit estimée par les utilisateurs des modèles à l'aide de test de sensibilité en particulier aux caractéristiques du projet à évaluer (par exemple avec la réduction de la vitesse limite de 130 à 110 km/h ou avec des variations sur les coûts de péage).

Cette sensibilité induit une convergence relativement lente de l'algorithme d'affectation (en nombre d'itération), surtout si la demande de trafic est élevée. Il est ainsi nécessaire de vérifier la bonne convergence des modèles. On retiendra que la concurrence entre deux itinéraires de coût proche (souvent en pratique lorsque les distances sont très proches) rend difficile la convergence en chemin (ou flux auxiliaires) du modèle prix-temps.

On peut difficilement conclure sur les temps de calcul d'affectation car ils dépendent principalement de la taille du réseau, de la matrice de demande, et de la puissance des ordinateurs utilisés.

Le changement des courbes temps-débit a un impact équivalent à celui de la loi d'affectation : les différences observées dans les résultats peuvent être relativement importantes. Même si toutes les courbes ont évolué globalement de la même façon, l'amplitude et le sens des différences dépendent des types de routes en concurrence. On note cependant que ces nouvelles courbes ont tendance à favoriser les routes secondaires lorsque les volumes de demande sont élevés. Elles nécessitent donc une attention particulière sur le codage des vitesses à vide, des facteurs de concentrations, et éventuellement des capacités. Dans tous les cas, il est nécessaire de contrôler les vitesses modélisées, si possible à partir de données observées.

La recherche automatique des itinéraires permet d'augmenter la taille des réseaux. Le travail des modélisateurs est simplifié, mais il ne faut pas sous-estimer le temps nécessaire aux vérifications. De nombreux allers et retours sont nécessaires entre l'analyse des résultats d'affectation et le paramétrage des arcs.

Enfin, au niveau du bilan socio-économique, le changement d'instruction entre 1998 et 2007 a impliqué de nombreuses modifications, mais le taux d'actualisation a un impact prédominant sur les autres paramètres pour les indicateurs de rentabilité.

On retiendra notamment les éléments suivants :

- les tests de sensibilité sont indispensables ;
- la bonne convergence du modèle doit être vérifiée, et les cas de concurrence proches en coût doivent être évités ;
- les temps de parcours doivent être vérifiés.

1.2 - Retour sur les résultats des études des Cété

Au cours des études de comparaisons Ariane – TransCAD en Cété, des différences notables ont été observées dans les résultats de trafic et des bilans socio-économiques obtenus avec chacun des deux logiciels.

A l'origine de ces écarts, on trouve en premier lieu le codage des réseaux. Avec TransCAD, la plupart des réseaux a été construit à partir de la base routière nationale 30 000 arcs dans laquelle de nombreuses traversées d'agglomérations ne sont pas codées et les routes secondaires sont relativement peu pénalisantes. Les résultats auraient pu être nettement améliorés en accordant plus de temps au calage de ces réseaux.

Au niveau des bilans socio-économiques, les écarts en trafic sur le projet sont la principale source de différence entre les études Ariane et TransCAD. Pour une analyse à trafics identiques, on se reportera au chapitre IV pour connaître l'impact des changements dans les méthodes d'évaluation entre les instructions de 1998 et 2007.

Malgré ces différences, on peut tout de même conclure à la relative robustesse des prévisions de trafics interurbains et des bilans socio-économiques qui en découlent. En effet, ceux-ci sont généralement portés par un certain nombre d'OD qui sont susceptibles d'être intéressées par le projet. Pour ces OD, la part de trafic captée par le projet est importante quel que soit le modèle. C'est le nombre de ces OD et leur volume total qui donne le trafic sur le projet et les principaux gains de temps. Les résultats sont donc du même ordre de grandeur quelle que soit la loi d'affectation et ses différents paramètres. Lorsque que ce n'est pas le cas, des explications se trouvent bien souvent dans la matrice de demande utilisée dans les modèles, les avantages croissant avec le volume de trafic global. Pour certaines études réalisées récemment dans le domaine urbain avec une description fine de tous les trafics, on obtient des indicateurs de rentabilité socio-économiques très élevés. Il devient ainsi utile de pouvoir afficher la répartition des gains totaux et unitaires (par usager) géographiquement et par type d'avantage, ou encore par exemple la répartition des gains de temps monétarisés en fonction du gain de temps unitaire ou de la distance parcourue par les usagers.

Finalement, les études de comparaison ont surtout permis aux Cété de se former au nouvel outil et de s'adapter à la fois au fonctionnement concret des nouveaux programmes et à leur mise en pratique pour les études de trafic. Elles ont participé à l'amélioration des méthodes de travail avec TransCAD en partageant les difficultés rencontrées et les techniques de résolution apportées par les différents utilisateurs. Elles ont permis de détecter un certain nombre de points d'amélioration, principalement au niveau des calculs du bilan socio-économique mais aussi au niveau ergonomique. Elles ont été à l'origine de modifications demandées à Caliper dans le cadre de la maintenance de TransCAD et des Modules Sétra.

Parmi les améliorations et les techniques développées au cours des études de comparaison, on peut noter :

- une procédure de récupération des données Ariane ;
- les corrections apportées au réseau 30 000 arcs dont tous les utilisateurs profitent aujourd'hui ;
- une base de données de zones correctement géoréférencées pour leur utilisation dans TransCAD ;
- pour la bonne prise en compte des aménagements sur le réseau dans le bilan socio-économique, le développement d'une alternative avec la définition d'opérations d'ouverture et de fermeture d'arc à la place d'opération de modification d'arc ;
- le développement d'une macro en GISDK (le langage de programmation de TransCAD) pour calculer les avantages au niveau des arcs, et pallier les problèmes de convergence du calcul socio-économique quand la convergence en chemin n'est pas atteinte.

Elles ont permis de faire apparaître certaines faiblesses des Modules Sétra, et de prévoir leur résolution dans le cadre de la maintenance. Il s'agissait principalement de supprimer :

- la limitation du nombre de chemins efficaces par itération ;
- les perturbations dans la recherche des chemins efficaces avec les interdictions de mouvements tournants ;
- les différences entre les deux sens de circulation par arc AB-BA.

Ces points, aujourd'hui résolus, ont été traités en priorité dans le cadre du contrat de maintenance avec Caliper.

Enfin, ces études ont confirmé la nécessité de travailler sur les méthodes de calage. Avec la participation de 3 Cété, le Sétra a formé un groupe de travail sur le calage et la validation des modèles d'affectation du trafic. Son objectif est de réaliser un état de l'art comparant les pratiques en Cété, à l'étranger et dans le domaine de la recherche, et de produire un guide de recommandations sur ce thème.

1.3 - Temps de travail

Un des objectifs des études de comparaison Ariane-TransCAD effectuées par les Cété était d'estimer le temps nécessaire pour réaliser une étude avec chacun des logiciels, sur la base du détail des temps passés à chaque étape de celles-ci. En fait, il a été difficile d'identifier le temps réellement passé pour chacune des étapes étant donné leurs imbrications dans le travail des modélisateurs. Les tableaux issus des rapports des Cété ne permettent pas d'obtenir des résultats significatifs.

Dans le cadre des comparaisons Ariane-TransCAD, les modélisateurs avec TransCAD ont souvent été distincts des modélisateurs avec Ariane. De façon générale pour les études de projets, il est fréquent que l'ensemble des tâches ne soit pas traité par la même personne. Par exemple l'étape de construction de la matrice est réalisée par une personne différente de celle qui construit et exploite le modèle. Cela constitue une autre difficulté pour comparer les temps de travail entre deux études.

Cependant, nous pouvons apporter plusieurs éléments de réflexion :

- le temps de travail nécessaire dépend beaucoup du contexte de départ, des objectifs et des délais impartis ;
- il dépend aussi de l'existence de bases de données, de leur degré de mise à jour, de l'existence d'un modèle préalable sur la même zone, de sa taille, de son échelle, …

Finalement il faut retenir que l'élaboration d'un modèle se fait toujours sur une longue période de temps. Un premier modèle simpliste peut-être utilisé dans les premières phases d'études d'un projet, dont les résultats seront relativement approximatifs. L'amélioration des bases de données, la réalisation d'enquêtes supplémentaires et une plus grande précision dans le calage du modèle permettent ensuite d'obtenir des résultats avec plus de précision et plus de fiabilité, en un mot de meilleure qualité. Le temps nécessaire pour réaliser une étude est ainsi très variable en fonction des travaux menés pour répondre aux exigences du commanditaire en termes de qualité des résultats.

2 - Bilan du passage d'Ariane à TransCAD

2.1 - Les apports de TransCAD

2.1.1 - Le Système d'Information Géographique

Le SIG de TransCAD est l'apport de TransCAD le plus évident. Ses utilisations sont nombreuses et variées, à toutes les étapes de l'étude de trafic.

Lors de la construction du réseau, les croisements possibles avec toutes les bases de données géographiques (cartes IGN, Orthophoto, bases ministères sur le réseau routier national, …) permettent de simplifier l'import, la saisie et la vérification des données d'entrée.

A l'étape de calage du modèle, les données de comptages, peuvent être importées et être utilisées en nombre très important. Les comparaisons entre données modélisées et comptages sont facilitées par le SIG (notamment avec la possibilité de cartographier les écarts).

Pour l'exploitation du modèle, le SIG permet la visualisation cartographique directe des résultats et la réalisation de cartes pour des documents de présentation.

Parmi les utilisations les plus intéressantes, on peut citer :

- les croisements entre les SIG de différents réseaux de transport (routier et ferroviaire par exemple) ;
- les bases des communes et des îlots pour estimer la densité de population autour des infrastructures ;
- les bases de données sur l'occupation des sols qui permettent notamment de déterminer la longueur de traversée des agglomérations ;
- la comparaison entre données de trafics issus de comptages et les résultats du modèles ;
- l'utilisation d'appareils de mesure GPS embarqués dans des véhicules parcourant le réseau pour transmettre des informations au SIG et ainsi créer des bases de données de vitesses et de temps de parcours ;
- l'exploitation des données et des résultats facilitée : lignes de désirs, isochrones…

Contrairement à d'autres logiciels SIG, TransCAD permet en plus de réaliser des calculs de plus court chemin, selon des critères paramétrables (distance, temps, coût généralisé, …) pour plusieurs OD simultanément, et également de chercher les k plus courts chemins. Ces outils sont d'une grande utilité pour la modélisation des transports.

2.1.2 - La gestion des bases de données

En plus du SIG qui permet de gérer les bases de données géographiques, TransCAD gère de nombreux formats de données, ce qui permet d'échanger avec de nombreux autres logiciels comme MapInfo, Excel, Access, et d'autres logiciels de Modélisation (Emme 2, MinUTP, Saturn, FSUMTMS, TModel, TranPlan, TP+). TransCAD possède également ses propres outils de gestion des bases de données.

Les outils de gestion et de calcul des matrices OD sont particulièrement développés. Ils permettent de faire de nombreux calculs vectoriels et matriciels (transposition, addition, soustraction, multiplication, dés/agrégation, convolution, …). Alors que les relations OD n'étaient représentées dans Ariane que sous forme de listes, TransCAD permet de mettre à jour les matrices en fonction du zonage et de visualiser le résultat par exemple à l'aide de lignes de désirs entre toutes les zones.

2.1.3 - Les modèles à 4 étapes

TransCAD possède des outils qui permettent de calibrer des modèles de génération et de distribution de déplacements à partir de données socio-économiques par zone (méthode de construction de la matrice de déplacements surtout utilisée dans le domaine urbain). De même pour l'étape de choix modal, il est possible de tester différentes formulations et de calibrer les paramètres des utilités. Il est également aisé de travailler avec différentes périodes de modélisation, par exemple les différentes heures représentatives de la journée (heure creuse, heure de pointe du matin, du soir, ...).

Toutes ces possibilités sont à l'heure actuelle peu explorées dans le domaine interurbain, mais ont vocation à se développer notamment dans le cadre de commandes de modèles multimodaux à l'échelle régionale.

2.1.4 - Outil de programmation GISDK

TransCAD intègre une plate-forme de développement à l'aide de son propre langage de programmation : le GISDK (pour Geographic Information System Developer's Kit : le kit de développement du SIG).

Les outils de programmation incluent un enregistreur de tâches (le mode batch) pour créer le code de lancement correspondant aux tâches effectuées. Cela offre la possibilité d'automatiser et de répéter de nombreuses manipulations, et de créer des programmes de calculs complexes, comme les modèles à quatre étapes avec bouclage. Après une première itération de l'ensemble de la chaîne de modélisation, les résultats d'affectation peuvent être utilisés pour mettre à jour les coûts de déplacements entre les différentes zones aux étapes de distribution et de choix modal. Un autre exemple d'application se trouve dans les modèles prenant en compte les interactions entre transport et urbanisme, où les résultats d'accessibilité des zones peuvent ensuite être utilisés pour mettre à jour les choix de localisation des emplois et des lieux de résidences.

Le GISDK permet de lancer toutes les fonctions de TransCAD, de programmer ses propres routines (macro) et ses propres outils et leur éventuelle interface utilisateurs. C'est le cas des modules Sétra de TransCAD, qui font appel aux fonctions TransCAD et au code en C de l'affectation prix-temps.

De plus, il est possible de lancer des calculs dans TransCAD depuis d'autres logiciels et inversment.

Le Sétra travaille à la rédaction d'un guide d'utilisation du GISDK afin d'exploiter pleinement toutes ses possibilités.

2.1.5 - Ergonomie

Lors de la prise en main du nouvel outil, deux difficultés ergonomiques sont apparues avec TransCAD. La première est liée au fait que le logiciel support est en anglais. Si cela n'a posé que très peu de difficultés aux jeunes générations de modélisateurs, cela a été moins bien perçu auprès des modélisateurs Ariane les plus expérimentés. Bien que les modules Sétra soient en français, il est régulièrement nécessaire de faire appel aux fonctions TransCAD (par exemple pour les cartes et pour les matrices). Le deuxième point qui peut être déroutant est le grand nombre de fonctionnalités disponibles, bien que celles-ci sont également perçues comme un point fort du logiciel. Mais ces deux points restent sans comparaison avec la nécessité sous Ariane de comprendre les lignes de codes correspondant aux données d'entrée et de sortie.

Une importante avancée a été effectuée avec les temps de chargements et d'initialisation des calculs très longs dans Ariane, alors qu'ils sont quasi nuls dans TransCAD.

Un autre point crucial de l'ergonomie se trouve dans les possibilités d’analyse des résultats. Avec Ariane, il était relativement simple d'obtenir la part relative des OD pour une section donnée, et la part relative des chemins pour une relation donnée. Ces mêmes possibilités existent avec TransCAD, mais des améliorations sont possibles quant aux nombres de manipulations à effectuer. Ce dernier possède en revanche les avantages liés aux aspects cartographiques, avec une visualisation quasi directe des résultats sur la carte (analyse thématique, …).

De façon générale, une fois habitué à l'interface TransCAD, l'utilisateur apprécie la grande souplesse de l'outil dans son ensemble et ses nombreuses possibilités.

2.2 - Des points de développement et d'approfondissement

A l'issue des études de comparaison, nous pouvons revenir sur les objectifs initialement fixés (cf Chap I § 3.1) et conclure qu'ils ont été atteints par le nouveau logiciel. Nous allons voir tout de même les développements qui sont à l'étude pour répondre à de nouveaux besoins. Enfin, nous pouvons citer deux objectifs relevant en fait de questions méthodologiques qui nécessitent des approfondissements. Il s'agissait des études multimodales et de la prise en compte des effets de la signalisation (que l'on peut intégrer dans le cadre plus général des méthodes de calage).

2.2.1 - Les développements logiciels

Les points d'améliorations des outils qui font actuellement l'objet de réflexions avant leur développement sont les suivants :

- corrections des calculs du bilan socio-économique, avec la prise en compte des coûts des opérations de modifications, clarification de la prise en compte des champs au niveau du réseau (relief, zone de viabilité hivernale) ;
- prise en compte de la croissance des trafics pré-chargés au niveau des arcs : ajouter une croissance paramétrable sur le même principe que pour la croissance des trafics de la matrice OD dans les calculs de bilan socio-économique ;
- ajout de possibilités supplémentaires pour les calculs du bilan : prise en compte d'années où les calculs d'affectation sont déjà effectués, hypothèses d'affectation (temps et coûts de circulation) différenciées entre la situation de projet et celle de référence (pour une plus grande souplesse dans la définition des scénarii d'aménagement de projet et de référence).

Ces améliorations portent essentiellement sur l'interface GISDK des modules Sétra et peuvent être réalisées par Caliper puis vérifiées en interne.

D'autres développements sont actuellement envisagés :

- affectation prix-temps avec plusieurs classes VL et PL, notamment afin de différencier les différents types de poids lourds (qui ne supportent pas les mêmes coûts), les différents motifs VL, etc ;
- adaptation du programme d'affectation afin qu'il puisse utiliser pleinement les multiples processeurs et ainsi accélérer les calculs avec les machines les plus récentes.

2.2.2 - Les développements méthodologiques

Les travaux méthodologiques du RST doivent permettre une meilleure utilisation des modules Sétra pour l'évaluation des projets routiers interurbains d'une part, des outils standards de TransCAD pour l'évaluation de projets de transport quel que soit leur mode d'autre part.

Pour les modules Sétra de TransCAD, certaines étapes de la construction et de l'exploitation des modèles de trafic routier font l'objet de travaux complémentaires en cours, notamment sur le calage et la validation des modèles d'affectation du trafic et en particulier la loi prix-temps.

Au-delà des programmes des modules Sétra dédiés aux projets routiers, les possibilités de modélisation multimodale de TransCAD font l'objet de documents d'aide à leur utilisation, déjà publié ou à venir. Ces outils sont en fait relativement simples d'utilisation pour ceux qui connaissent les principes théoriques de ces méthodes documentées par ailleurs. Une fois maîtrisés les outils nécessaires à la modélisation multimodale, la plateforme de programmation GISDK de TransCAD permet de chaîner les différents programmes, afin d'obtenir un modèle intégrant les modes de transports souhaités. Ces modèles permettent d'estimer les reports entre les différents modes de transports, dans les limites de capacité de prédiction des modèles de choix modaux.

Techniquement, la plateforme de TransCAD offre donc tous les outils nécessaires à une évaluation globale multimodale, du même type que celle qui est réalisée avec les modules Sétra pour les projets routiers interurbains. Les difficultés pour la réalisation d'un tel programme intégré d'évaluation multimodale relèvent

donc plus de questions méthodologiques et de la disponibilité des données pour paramétrer les modèles. Parmi ces difficultés, on peut citer entre autres la modélisation du choix modal et de l'évaluation socio-économique en milieu urbain.

Finalement, les plus forts enjeux pour l'évaluation et la modélisation multimodales restent des questions de méthodologies et de données à disposition tandis que les outils techniques mobilisables aujourd'hui peuvent être adaptés à ces méthodes.

Bibliographie

[1] Sétra. Guide des études de trafic interurbain. 1992

[2] Leurent F. ; Cost versus Time Equilibrium over a Network. *European Journal of Operation Research* Vol. 71/2, pp. 205-221. 1993.

[3] Leurent F. ; Une boîte à outils pour opérer diverses affectations statiques du trafic routier. INRETS Research Report n°198. INRETS, Arcueil. 1995.

[4] Leurent F. ; The theory and practice of a dual criteria assignment model with a continuously distributed value of time ; International symposium on transportation and traffic theory No13, Lyon (24/07/1996) pp. 455-477.

[5] C. Abraham, R. Coquand ; La répartition du trafic entre itinéraires concurrents. Revue Générale des Routes et Aérodromes. N°357, pp57-76. Paris, juin 1961.

[6] Barbier Saint Hilaire F. ; Mode d'emploi du logiciel Davis-Tribut-Equilibre, Rapport Inrets, 1992-1996.

[7] Dial R.; Bicriterion traffic assignment: efficient algorithms plus examples, Transportation Research B, vol 31, 1996.

[8] Leurent F. ; Comparaison de deux principes d'affectation du trafic. Convention Setra-Inrets. 1995.

[9] Leurent F. ; Calcul de deux modèles d'affectation. Convention Sétra-Inrets. 1998.

[10] Leurent F. ; Les valeurs du temps des automobilistes à Marseille en 1995, RTS n°60. 1998.

[11] Instruction et circulaire n°98-99 du 20 octobre 1998 relatives aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers en rase campagne. Direction des Routes. 1998.

[12] Instruction cadre du 25 mars 2004 relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport, mise à jour le 27 mai 2005 - METATM/ Comité des directeurs transports, 2005, 58 p.

[13] L'instruction DGR relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains (*version provisoire du 23 mai 2007*). Disponible sur le site intranet ministère de la DGITM : http://intra.dgitm.i2/article.php3?id_article=5380

[14] Commissariat Général du Plan. Transports : choix des investissements et coût des nuisances – dit "Rapport Boiteux II ". juin 2001

[15] Commissariat Général du Plan, Révision du taux d'actualisation des investissements public - dit "Rapport Lebègue". janvier 2005

[16] Guide d'utilisation de TransCAD pour la représentation de l'offre et de la demande de transport multimodales. Mars 2008

[17] Guide d'utilisation des modules Sétra de TransCAD. Octobre 2007.

[18] Modélisation de la variation annuelle des trafics routiers – Calcul des facteurs de concentration. Sétra. Note d'information - Série Transports n°4. Référence : 0938w - 6 pages. Juillet 2009.

Glossaire

Avantage : on appelle avantage un coût ou un gain engendré par le projet. L'avantage de carburant peut représenter une dépense supplémentaire pour les usagers s'il est négatif ou un gain s'il est positif. On peut parler également de l'avantage d'une année, il s'agit alors de la somme des coûts et des gains engendrés par le projet à une année donnée.

Avantage net global du scénario d'aménagement : l'avantage net global du scénario d'aménagement est la somme actualisée des avantages des usagers routiers, des tiers (incluant les riverains), de la Puissance Publique (à laquelle on attribue les avantages de sécurité non pris en compte par les usagers), des opérateurs du réseau concédé et éventuellement des usagers des autres modes de transport diminués des dépenses d'entretien et d'exploitation du scénario d'aménagement et, éventuellement, des pertes de recettes des opérateurs des autres modes de transport réduites de leurs économies de frais d'exploitation et d'entretien.

Le bénéfice actualisé : il s'agit de la somme des coûts et des avantages du projet sur toute sa durée de vie, il caractérise la rentabilité du projet.

Le Taux de Rentabilité Interne : il s'agit du taux d'actualisation qui annule le bénéfice actualisé, il caractérise l'opportunité et la robustesse du projet.

Le bénéfice par euro investi : il s'agit du rapport entre le bénéfice actualisé et le coût d'investissement, il caractérise la rentabilité du projet dans un contexte de contrainte financière.

Le bénéfice actualisé par euro public investi : il s'agit du rapport entre le bénéfice actualisé et le coût du projet pour la Puissance Publique (entretien et exploitation inclus), il caractérise la rentabilité du projet dans un contexte de rareté des fonds publics et de PPP.

Annexes

Annexe 1 - Liste des études comparatives réalisées par les CETE

CETE	Étude de Comparaison Ariane/TransCAD : Projets d'infrastructure
CETE de Lyon	A 48
CETE Méditerranée	(Études Ariane et TransCAD différentes)
CETE Nord-Picardie	Pas d'utilisateur d'Ariane
CETE de l'Ouest	A 831
CETE du Sud-Ouest	Poitiers-Limoges
CETE Normandie-Centre	RN 12
CETE de l'Est	Colmar-Sélestat

Annexe 2 - Besoins d'évolution du logiciel Ariane

Extrait de l'étude d'opportunité - Informatisation d'un Modèle d'Affectation Prix-Temps. Version finale du 26/02/2001 – Sétra.

« Le tableau ci-après fait le recensement des besoins des utilisateurs d'Ariane : il comprend à la fois les besoins exprimés ouvertement et les besoins sous-jacents au travers des pratiques.

CONTENU DES MODELES
Avoir différentes valeurs du temps selon les motifs ou les longueurs
Possibilité de paramétrer le φVL plus localement
Possibilité de passer des trafics en MJA aux trafics horaires ou par période (mais l'affectation reste en MJA)
Possibilité d'affecter des trafics par période (horaire ou HP/HC etc.)
Possibilité de prendre en compte la signalisation
Possibilité de faire des études multimodales
MANIPULATION DE L'INFORMATION (données et résultats)
Automatisation de la manipulation de l'information
Ajustement automatique de la matrice à partir des comptages (d'après une méthode statistique)
Recherche automatique des itinéraires
Semi-automatisation d'une partie du calage (ex. chargement automatique des trafics locaux)
Recherche automatique du plus court chemin
Possibilité de modifier les itinéraires obtenus automatiquement
Fonctionnalités de visualisation
Au moins toutes les analyses déjà existantes dans le système actuel : Sous forme graphique : analyses de tronçons, visualisation des itinéraires sur le graphe, présentation des données, Sous forme de tableaux de résultats : analyses de tronçons, trafics, itinéraires, etc.
Possibilité de trier les tableaux de résultats dans le logiciel
Visualiser sur le graphe les itinéraires qui passent par une arête donnée (d'où la notion imagée de chevelu)
Possibilité de sauvegarder des modèles de graphes
Possibilité de réaliser des histogrammes, ou autres types de graphiques
Communication avec les autres logiciels

Rendre compatible l'échange de données avec un SIG tel que MAPINFO (passerelle vers un SIG)
Disposer d'une base réseau de référence sous SIG (type réseau 30 000 arcs)
Faire interagir le graphe avec la base de données pour les mises à jour de la base (SIG plus intégré)
Disposer d'une passerelle vers EXCEL/ACCESS, au moins l'équivalent du système actuel
Disposer d'une passerelle vers GEODE
CALCULS PARTICULIERS
Calculer des matrices de temps de parcours
Calculer des matrices de coût
Réaliser des isochrones
Faire des calculs d'accessibilité (selon l'annexe 13 de l'instruction)
Avoir un calcul économique spécifique aux scénarios de séquencement
Avoir un calcul économique spécifique aux projets avec situation de référence variable
Avoir le calcul du bilan financier
PERFORMANCES
Diminution des temps de calcul
Diminution des temps de chargement des données
Diminution des temps de sauvegarde des résultats

Annexe 3 - Synthèse de l'étude d'opportunité comparant les scénarii d'évolution du logiciel Ariane

Extrait de l'étude d'opportunité - Informatisation d'un Modèle d'Affectation Prix-Temps. Version finale du 26/02/2001 – Sétra.

"Tableau de synthèse de l'analyse multicritère des scénarii :

	Scénario progiciel	Scénario maison
Coût externe d'investissement, hors administration	De 291 à 515 k€	De 370 à 500 k€
Études et réalisation	de 224 à 363 k€	de 370 à 500 k€
Achat des licences	de 67 à 152 k€	-
Maintenance des licences/an	de 43 à 67 K€ (1,7 à 2,6 k€ /licence)	-
Charges		
Études et réalisation	De 22 à 36 hommes*mois	De 36 à 50 hommes*mois
Suivi MO+ME	De 9 à 15 hommes*mois	De 15 à 21 hommes*mois
Recette et accompagnement (MO)	6 hommes*mois	8 à 9 hommes*mois
Risques	Pérennité de l'éditeur Adaptation difficile des utilisateurs à court terme	Capacité de conduite au SETRA Rejet par les utilisateurs à moyen terme
Évolutivité	Meilleur pour aller vers l'intermodalité, la génération, la distribution	Évolutivité plus coûteuse
Ergonomie	Charge/sauve les données efficacement. Temps de calcul plus incertains Progiciels puissants donc plus lourds	Incertitude sur les performances Fonctions courantes simples
Capacité fonctionnelle		
Par rapport à l'existant : régressions éventuelles	Quelques régressions observées sur certains progiciels	
Techniques de modélisation	Nombreuses techniques disponibles : avantage pour traiter l'intermodal	
Complétude fonctionnelle	Meilleur Nombreuses fonctions disponibles Apporte des réponses aux besoins issus de l'enquête utilisateurs	Moins de tâches automatisées, moins de fonctions disponibles. Ou bien des développements supplémentaires nombreux

Le scénario maison peut paraître intéressant car il semble le plus adéquat aux pratiques actuelles des utilisateurs, mais c'est un scénario à court terme.

A moyen terme, si l'on souhaite que les études en interurbain évoluent vers des méthodes urbaines, on se heurtera avec ce scénario à des problèmes d'évolutivité importants. Le seul moyen d'y remédier sera alors d'acquérir les outils adéquats : l'économie de ce scénario en achats de licences risque de n'être que temporaire.

Le scénario progiciel posera des difficultés d'acceptabilité et d'apprentissage au début. Il répond cependant plus efficacement aux problèmes de performances, possibilités de paramétrage, ... souvent soulevés par les utilisateurs. Il nécessitera un projet d'accompagnement très solide."

Annexe 4 – Extrait de la table de typologie SETRA_VDF

Pour la description de tous les champs de la table de typologie, voir la note de présentation de la table Sétra_VDF.

TYPE	ROUTE	CONCEDE	FORMULE	CAPACITE	E	CHI_V	CHI_C	Tvide_V [info]	Vvide_V [info]	GAMMA_V	ALPHA_V	Tvide_C [info]	Vvide_C [info]	GAMMA_C	ALPHA_C
1	5m	0	2	950	3,0	1,6	1,4	0,754	80	0,41	2,6	0,80	74,59	0,24	1,6
2	6m	0	2	1220	3,0	1,6	1,4	0,754	80	0,41	2,6	0,80	74,59	0,24	1,6
3	7m	0	2	1350	3,0	1,6	1,4	0,659	91	0,41	2,6	0,75	79,98	0,24	1,6
4	3 voies/9m	0	2	1650	3,0	1,6	1,4	0,659	91	0,50	3,0	0,75	79,98	0,31	2,2
5	3 voies/10.5m	0	2	1830	3,0	1,6	1,4	0,659	91	0,50	3,0	0,75	79,98	0,31	2,2
6	4 voies/14m	0	2	3100	3,0	2,2	1,2	0,659	91	0,41	4,0	0,75	79,98	0,23	1,5
7	2x2 voies (carrefour plan)	0	2	3100	3,0	2,3	1,2	0,545	110	0,41	4,0	0,72	82,99	0,23	1,5
8	2x2 voies (autoroute concedee)	1	1	3460	2,5	2,7	1,1	0,458	131		4,0	0,69	86,83		1,0
9	2x3 voies (autoroute concedee)	1	1	5190	2,5	2,6	1,1	0,458	131		6,0	0,69	86,83		1,0
90	2x4 voies (autoroute concedee)	1	1	6920	2,5	2,6	1,1	0,458	131		6,0	0,69	86,83		1,0
10	2x2 voies (route express)	0	2	3460	2,5	2,6	1,1	0,545	110	0,41	4,0	0,72	82,98	0,16	1,0
11	7m (route express)	0	2	1730	3,0	1,6	1,4	0,608	99	0,41	2,6	0,72	82,98	0,24	1,6
12	2x2 voies (carrefour giratoire)	0	2	3100	3,0	2,3	1,2	0,545	110	0,41	4,0	0,72	82,98	0,23	1,5
13	2x2 voies (ar non concedee)	0	1	3460	2,5	2,7	1,1	0,458	131		4,0	0,69	86,83		1,0
14	2x3 voies (ar non concedee)	0	1	5190	2,5	2,6	1,1	0,458	131		6,0	0,69	86,83		1,0
140	2x4 voies (ar non concedee)	0	1	6920	2,5	2,6	1,1	0,458	131		6,0	0,69	86,83		1,0
15	2x2 voies (voie rapide urbaine)	0	2	4000	3,0	2,0	1,3	0,750	80	0,41	4,0	0,83	72,54	0,06	1,0
16	2x3 voies (voie rapide urbaine)	0	2	6000	3,0	2,0	1,3	0,750	80	0,41	6,0	0,83	72,54	0,06	1,0
160	2x4 voies (voie rapide urbaine)	0	2	8000	3,0	2,0	1,3	0,750	80	0,41	6,0	0,83	72,54	0,06	1,0
20	Urbain petite agglo	0	3		3,0			1,050	57			1,16	51,95		
21	2 voies normales	0	4	1200	3,0	1,6	1,1	1,300	46	5,60	3,4	1,50	40,00	5,60	3,4
22	2 voies rapides	0	4	1200	3,0	1,6	1,1	0,830	72	2,70	3,5	0,92	65,22	2,70	3,5
23	3 voies normales	0	4	1600	3,0	1,6	1,1	1,300	46	4,00	3,5	1,50	40,00	4,00	3,5
24	3 voies rapides	0	4	1600	3,0	1,6	1,1	0,830	72	2,70	3,5	0,92	65,22	2,70	3,5
25	4 voies normales	0	4	2400	3,0	1,6	1,1	1,300	46	2,70	3,5	1,50	40,00	2,70	3,5
26	4 voies rapides	0	4	2400	3,0	1,6	1,1	0,830	72	2,70	3,5	0,92	65,22	2,70	3,5
27	2 voies larges	0	4	1400	3,0	1,6	1,1	1,300	46	4,00	3,5	1,50	40,00	4,00	3,5
28	6 voies normales	0	4	3600	3,0	1,6	1,1	1,300	46	2,70	3,5	1,50	40,00	2,70	3,5
29	6 voies rapides	0	4	3600	3,0	1,6	1,1	0,830	72	2,70	3,5	0,92	65,22	2,70	3,5
30	Connecteur	0	4	9000	3,0	1,0	1,0	1,500	40	0,00	1,0	1,50	40,00	0,00	1,0

TYPE	ROUTE	CEV_VL	CEV_PL	DEV_VL	DEV_PL	CAR_VL	CAR_PL	PKM_VL	PKM_PL	MAL_VL	Coût km PL [info]	Coût km VL 2000[info]	Ckm VL 2010 [info]
1	5m	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
2	6m	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
3	7m	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
4	3 voies/9m	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
5	3 voies/10.5m	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
6	4 voies/14m	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
7	2x2 voies (carrefour plan)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0300	0,390	0,197	0,200
8	2x2 voies (autoroute concedee)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,066	0,149	0,0000	0,539	0,233	0,233
9	2x3 voies (autoroute concedee)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,066	0,149	0,0000	0,539	0,233	0,233
90	2x4 voies (autoroute concedee)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,066	0,149	0,0000	0,539	0,233	0,233
10	2x2 voies (route express)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0070	0,390	0,174	0,175
11	7m (route express)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0320	0,390	0,199	0,202
12	2x2 voies (carrefour giratoire)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0300	0,390	0,197	0,200
13	2x2 voies (ar non concedee)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0000	0,390	0,167	0,167
14	2x3 voies (ar non concedee)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0000	0,390	0,167	0,167
140	2x4 voies (ar non concedee)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0000	0,390	0,167	0,167
15	2x2 voies (voie rapide urbaine)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0000	0,390	0,167	0,167
16	2x3 voies (voie rapide urbaine)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0000	0,390	0,167	0,167
160	2x4 voies (voie rapide urbaine)	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0000	0,390	0,167	0,167
20	Urbain petite agglo	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
21	2 voies normales	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
22	2 voies rapides	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0310	0,390	0,198	0,201
23	3 voies normales	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
24	3 voies rapides	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0310	0,390	0,198	0,201
25	4 voies normales	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
26	4 voies rapides	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0310	0,390	0,198	0,201
27	2 voies larges	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
28	6 voies normales	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0540	0,390	0,221	0,227
29	6 voies rapides	0,07	0,13	0,027	0	0,07	0,26	0,000	0,000	0,0310	0,390	0,198	0,201
30	Connecteur	0,00	0,00	0,000	0	0	0,00	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000

Rédacteurs

Éric JEANNIÈRE – Sétra
Émilie JEANNESSON-MANGE – Sétra
Pascaline COUSIN – Sétra

Contact

Éric JEANNIÈRE
téléphone : 33 (0)1 46 11 35 49
mél : eric.jeanniere@developpement-durable.gouv.fr

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
46, avenue Aristide Briand – BP 100 – 92225 Bagneux Cedex – France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 31 – télécopie : 33 (0)1 46 11 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :
• Internet : http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr
• Intranet (Réseau ministère) : http://intra.setra.i2

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du MEEDDM

